



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E
GEOFÍSICA

**IMAGEAMENTO GPR E MEDIDAS PETROFÍSICAS DE ROCHAS
CARBONÁTICAS CARSTIFICADAS DA FORMAÇÃO SALITRE,
NORTE DA BAHIA**

Autora:

Iurianne Monik Medeiros Conti

Orientador:

David Lopes de Castro

Dissertação nº 208/PPGG

Natal/RN
23 de Julho de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA

**IMAGEAMENTO GPR E MEDIDAS PETROFÍSICAS DE
ROCHAS CARBONÁTICAS CARSTIFICADAS DA
FORMAÇÃO SALITRE, NORTE DA BAHIA**

Autora:

Iurianne Monik Medeiros Conti

Dissertação de Mestrado apresentada
em 23 de julho de 2018 ao Programa de
Pós-Graduação em Geodinâmica e
Geofísica (PPGG) da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
como requisito a obtenção do Título de
Mestre em Geodinâmica e Geofísica.

Comissão examinadora

Prof. Dr. David Lopes de Castro (PPGG/UFRN – Orientador)
Prof. Dr. Josibel Gomes de Oliveira Júnior (DGEF/UFRN – Membro Externo)
Prof. Dr. José Antônio Barbosa (UFPE – Membro Externo)

Natal/RN
23 de Julho de 2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Conti, Iurianne Monik Medeiros.

Imageamento GPR e medidas petrofísicas de rochas carbonáticas carstificadas da formação salitre, norte da Bahia / Iurianne Monik Medeiros Conti. - 2018.

71f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2018.

Orientador: David Lopes de Castro.

1. Geofísica - Dissertação. 2. Carste - Dissertação. 3. Rochas carbonáticas - Dissertação. 4. Fraturas - Dissertação. 5. Porosidade - Dissertação. 6. Permissividade dielétrica - Dissertação. 7. GPR - Dissertação. I. Castro, David Lopes de. II. Título.

RN/UF/CCET

CDU 550.3

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo seu infinito amor e misericórdia, que em nenhum momento deixou me sentir sozinha nesta caminhada.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) pela oportunidade de realizar esse mestrado. Ao projeto Porocarste/Petrobras pelo financiamento da pesquisa.

Agradeço ao Professor Dr. David Lopes de Castro pela orientação, apoio e dedicação dados a este trabalho.

Ao Professor Dr. Francisco Hilário Bezerra pelas sugestões e contribuições, pela coorientação e por todo apoio neste projeto.

Ao Professor Dr. Márcio Assolin Corrêa por gentilmente realizar as medidas de permissividade dielétrica no Laboratório de Caracterização Elétrica e Magnética da UFRN.

Ao meu companheiro Tomaz Lima pelo apoio emocional e também pelo apoio técnico. A minha família pela torcida.

A geóloga da Petrobras Caroline L. Cazarin por ceder as amostras de plug e pelas suas contribuições no trabalho.

A Juliana G. Rabelo pela imensa ajuda. A Adler P. de Araújo e Cícero R. da Silva pelo trabalho de aquisição de dados.

A todos os amigos que contribuíram direta ou indiretamente nessa caminhada. Em especial a Thayane S. C. Victor, pela amizade e pelo apoio emocional. Aos colegas de trabalho do Laboratório de Sismologia da UFRN.

Resumo

O presente estudo compreende uma análise integrada de dados GPR e petrofísicos que permitiram definir a distribuição tridimensional de zonas cársticas e a distribuição de porosidade a partir de atributos GPR, em unidades de rochas carbonáticas fraturadas da Formação Salitre na Pedreira Sal (norte da Bahia). Zonas caracterizadas por reflexões de baixa amplitude podem estar associadas a halos de dissolução mineral que se desenvolveram em torno de fraturas e planos de acamamento. Os volumes GPR mostram uma geometria 3D das zonas de rochas carbonáticas carstificadas, com orientações e dimensões semelhantes ao conjunto de condutos controlados pelos sistemas de fraturas de direção N-S e E-W, observado em imagens de veículos aéreos não tripulados. Medidas em amostras de plugs indicam que a dissolução modificou a densidade, a permissividade dielétrica e a porosidade das rochas carbonáticas estudadas. A densidade média e a permissividade dielétrica relativa diminuíram de 2714 para 2713 kg/m³ e de 7,36 para 6,81, respectivamente, e a porosidade média aumentou ligeiramente de 0,95% para 1,08%. Essas mudanças nas propriedades da rocha afetam os contrastes da impedância EM entre os horizontes carbonáticos, causando a atenuação do sinal GPR. A correlação entre a permissividade dielétrica e a porosidade pode ser analisada usando o Modelo de Índice de Refração Complexo (CRIM), que usa a velocidade EM estimada a partir de dados GPR. Apesar da porosidade obtida pelo CRIM ser um pouco mais baixa que a porosidade medida nas amostras coletadas, devido às diferentes escalas de medição, o fato de que a porosidade é ligeiramente maior nas zonas carbonáticas carstificadas foi mantido. Além disso, os atributos instantâneos de amplitude e frequência foram utilizados para estimar a variabilidade espacial da porosidade ao longo de todo o volume de dados GPR. Assumindo a correlação empírica entre as propriedades físicas e atributos, dois volumes de porosidade estimada foram estabelecidos para as rochas carbonáticas carstificados na área estudada.

Palavras-chave: Carste, Rochas Carbonáticas, Fraturas, Porosidade, Permissividade Dielétrica, GPR

Abstract

Three-dimensional distribution of karstic zones and estimated porosity were obtained in fractured carbonate units of the Salitre Formation (Northern of the Bahia State) from GPR data and petrophysical. Low-amplitude GPR zones could be associated with mineral dissolution halos that developed around fractures and bedding planes. GPR volumes show a 3D mazelike geometry of the vertical karstified carbonate zones, similar with the set of passages controlled by ~N-S and E-W oriented fracture system, observed on surface in unmanned aerial vehicle images.

Measurements in plug samples indicate that the local karstification modified the density, dielectric permittivity and porosity of the studied carbonate rocks. While the average density and relative dielectric permittivity decreased from 2714 to 2713 kg/m³ and from 7.36 to 6.81, respectively, the average porosity slightly increased from 0.95% to 1.08%. These changes in the rock properties affect the EM impedance contrasts between carbonate bedding, causing attenuation of the reflected GPR signal. The correlation between dielectric permittivity and porosity could be analyzed using the complex refractive index model (CRIM), which uses EM velocity estimated from GPR data. The CRIM porosities are somewhat lower than porosities derived from plug sample due to different measurement scales. However, the fact that porosity is slightly higher in the karstified carbonates was maintained. In addition, GPR instantaneous amplitude and frequency attributes were used to estimate spatial variability in porosity throughout the whole GPR data volume. The crossplot of these two GPR attributes show that karstified zones generally cluster in narrow ranges of GPR instantaneous amplitude and in broad range of GPR instantaneous frequency. Assuming empirical correlation between physical properties and GPR attributes two predicted porosity volumes were established for the karstified carbonates in the studied area.

Keywords: Karst, Carbonates, Fractures, Porosity, Dielectric Permittivity, GPR

Índice

Agradecimentos	<i>pág. i</i>
Resumo	<i>pág. ii</i>
Abstract	<i>pág. iii</i>
Índice	<i>pág. iv</i>
Lista de Figuras.....	<i>pág. vi</i>
 Capítulo I – Introdução	
1.1 – Apresentação	<i>pág. 1</i>
1.2 – Justificativa	<i>pág. 1</i>
1.3 – Área de estudo	<i>pág. 2</i>
1.4 – Objetivos	<i>pág. 3</i>
 Capítulo II – Contexto geológico	
2.1 – Geologia regional	<i>pág. 5</i>
2.2 – Geologia local	<i>pág. 6</i>
 Capítulo III – Materiais e métodos	
3.1 – GPR	<i>pág. 12</i>
3.1.1 – Aquisição e processamento	<i>pág. 14</i>
3.2 – Petrofísica.....	<i>pág. 16</i>
3.2.1 – Medidas petrofísicas	<i>pág. 17</i>
3.2.2 – Modelo de Índice de Refração complexo (CRIM)	<i>pág. 17</i>

Capítulo IV – Artigo

Abstract	<i>pág. 27</i>
1. Introduction	<i>pág. 27</i>
2. Geological Setting	<i>pág. 29</i>
3. GPR Survey	<i>pág. 30</i>
3.1. Data Acquisition and Processing.....	<i>pág. 30</i>
3.2. GPR Attributes.....	<i>pág. 31</i>
4. Rock Properties and Porosity Prediction	<i>pág. 33</i>
4.1. Plug Samples	<i>pág. 33</i>
4.2. Porosity Estimation - CRIM	<i>pág. 34</i>
4.3. Porosity Estimation – GPR Attributes	<i>pág. 35</i>
5. Geometric Characterization of Altered Zone and Karstic Features	<i>pág. 36</i>
6. Discussions	<i>pág. 37</i>
6.1. 3D Porosity Estimation	<i>pág. 38</i>
6.2. 3D Geometric Characterization	<i>pág. 38</i>
7. Conclusions	<i>pág. 40</i>
Acknowledgements	<i>pág. 41</i>
References	<i>pág. 41</i>

Capítulo V – Conclusões.....	<i>pág. 56</i>
-------------------------------------	----------------

Referências	<i>pág. 58</i>
--------------------------	----------------

Lista de figuras

Figura 1.1 – Mapa de localização da área de estudo na região de Laje dos Negros - BA	pág. 4
Figura 2.1 – Mapa do Cráton do São Francisco mostrando os limites e as principais unidades estruturais. A poligonal em vermelho destaca a localização da Bacia de Irecê (Adaptado de BARBOSA et al. 2003)	pág. 8
Figura 2.2 – Mapa geológico da Bacia de Irecê com a localização da Pedreira Sal e o sistema de cavernas TBV-TBR (Adaptado de BORGES, 2016)	pág. 9
Figura 2.3 – Coluna estratigráfica da Formação Salitre (Retirado de PEDREIRA et al.,1985)	pág. 10
Figura 2.4 – Fácies das sequências estratigráficas da Formação Salitre identificadas na Toca da Boa Vista e na área de estudo. A Pedreira Sal corresponde a parte superior da fácies 7. (Modificado de KLIMCHOUK et al., 2016)	pág. 11
Figura 3.1 – Espectro eletromagnético indicando a faixa de atuação do GPR (OLIVEIRA JR, 2001)	pág. 19
Figura 3.2 – A: Princípio de funcionamento do GPR considerando duas camadas geológicas de constantes dielétricas diferentes (K1 e K2). B: Traço de GPR contendo registros dos tempos de chegada associados a onda direta pelo ar (Aw), onda direta pela terra (Gw), e reflexões (Rw) na interface das camadas 1 e 2 (OLIVEIRA JR, 2001)	pág. 19
Figura 3.3 – Sistema GPR utilizado na aquisição. Unidade central (SIR, 3000), odômetro, cabos de conexão e um par de antenas blindadas de 400 MHz	pág. 20
Figura 3.4 – Mapa de localização do levantamento GPR na Pedreira Sal, com destaque para as linhas L053 e L059, discutidas no texto	pág. 21
Figura 3.5 – Seção GPR L053 não processada, adquirida com as antenas de 400 MHz	pág. 22
Figura 3.6 – Fluxo de processamento dos dados GPR (baseado em XAVIER NETO, 2006)	pág. 22

Figura 3.7 – Amostras de rochas carbonáticas da Pedreira Sal, analisadas neste trabalho	<i>pág. 23</i>
Figura 3.8 – Amostra SAL.01-LB e sua respectiva pastilha de ~1,5 mm de espessura, serrada para medidas de permissividade dielétrica	<i>pág. 24</i>
Figura 3.9 – Analisador de impedância utilizado para efetuar as medidas da permissividade dielétrica	<i>pág. 25</i>

Capítulo I – Introdução

1.1 – Apresentação

O presente trabalho, sob o título “Imageamento GPR e Medidas Petrofísicas de rochas Carbonáticas Carstificadas da Formação Salitre, Norte da Bahia”, compõe a dissertação de mestrado que integra os requisitos necessários para a obter o título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica do Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). A mestranda contou com a orientação do Professor Dr. David Lopes de Castro para desenvolver a presente pesquisa. A pesquisa aqui apresentada, está vinculada ao Projeto Procarste (UFRN/Petrobras) que visa adquirir e interpretar parâmetros para caracterizar e modelar análogos de reservatórios em rochas carbonáticas.

A pesquisa realizada integrou dados de Radar de Penetração de solo (GPR) e dados petrofísicos de amostras das rochas estudadas, como medidas de porosidade, densidade e permissividade dielétrica, que permitiu uma correlação da porosidade estimada através de atributos GPR. A partir das informações obtidas foi produzido um manuscrito, apresentado no Capítulo 4, submetido a *Pure and Applied Geophysics*.

1.2 – Justificativa

Para a indústria de óleo e gás é de extrema importância o estudo de análogos de reservatórios de hidrocarbonetos, que permitem estudar em superfície características de um modelo comparável ao do reservatório, para que se possa ter um maior entendimento sobre o comportamento das rochas que ocorrem em subsuperfície.

As rochas carbonáticas totalizam de 25% a 35% de seções estratigráficas (SUGUIO, 2003). E cerca de 60% das reservas de hidrocarbonetos e 40% das reservas de gás encontram-se nessas rochas (SCHLUMBERGER, 2009). Por isso o crescente interesse em ampliar os estudos nesse tipo de reservatório.

As rochas carbonáticas podem ser de origem química e bioquímica, e formadas em diferentes ambientes de deposição, que podem ser do tipo marinho de água rasa, marinho de água profunda, água doce (lagos e fontes), e bacias evaporíticas (SUGUIO, 2003). Sua porosidade primária é resultante dos vários processos deposicionais e pós-deposicionais (MURRAY, 1960). Dessa maneira, apresentam um alto grau de heterogeneidade (AHR, 2008), o que torna desafiador sua caracterização.

O GPR é um método geofísico de fácil aquisição e apresenta um baixo custo em relação ao levantamento de dados. Este método de investigação rasa (poucas dezenas de metros) vem sendo bastante utilizado no estudo de ambientes cársticos e no estudo de análogos de reservatórios (JESUS *et al.*, 2012; FERNADES, 2014).

Ainda se tem uma escassez na bibliografia do uso de GPR no estudo de rochas carbonáticas para criação de modelos de análogos de reservatórios. A maior parte das pesquisas GPR nessas rochas são para monitoramento de risco geológico e recursos hídricos (OVERMEEREN, 1998; AL-FARES *et al.*, 2002).

Além disso, alguns estudos recentes correlacionam parâmetros do sinal de GPR com propriedades físicas como a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica (REPPERT *et al.*, 2000; ALSHARAH, 2016). Atributo GPR é uma quantidade específica que mede uma característica de interesse (CHOPRA *et al.*, 2005; ZHAO *et al.*, 2013). O uso de atributos tem contribuído para estimar a porosidade e a permeabilidade (CORBEANU *et al.*, 2002; MOUNT *et al.*, 2014).

1.3 – Área de estudo

A Pedreira Sal, objeto deste estudo, está localizada aproximadamente a 5 km de Laje dos Negros, no município baiano de Campo Formoso (Fig. 1.1). A pedreira apresenta rochas carstificadas e bastante fraturadas e antes de ser desativada, extraía calcário para fins comerciais. Do ponto de vista geológico, a área está inserida na Bacia de Irecê localizada na porção norte do Cráton São Francisco. As rochas carbonáticas que afloram na Pedreira Sal pertencem as unidades Neoproterozóicas da Formação Salitre, Grupo Una.

No local foi realizado levantamento de dados GPR, e foram adquiridas imagens de drone para confecção do mapa da pedreira. Também foram coletados plugs de rochas carbonáticas onde foram realizados os ensaios petrofísicos.

1.4 – Objetivos

Este estudo tem como objetivo principal estimar distribuição espacial da porosidade secundária de rochas carbonáticas da Formação Salitre na Pedreira Sal e caracterizar a geometria 3D destas. Para tanto, é necessário (1) identificar as feições cársticas e investigar a geometria 3D das rochas carbonáticas com dados GPR adquiridos na pedreira, (2) correlacionar parâmetros petrofísicos como porosidade (ϕ), densidade (ρ) e permissividade dielétrica (ϵ) e (3) gerar um cubo de distribuição espacial da porosidade a partir de atributos GPR. Assim feito, foi possível correlacionar dados petrofísicos e atributos GPR para estimar distribuição espacial da porosidade secundária nas unidades carbonáticas da Formação Salitre.

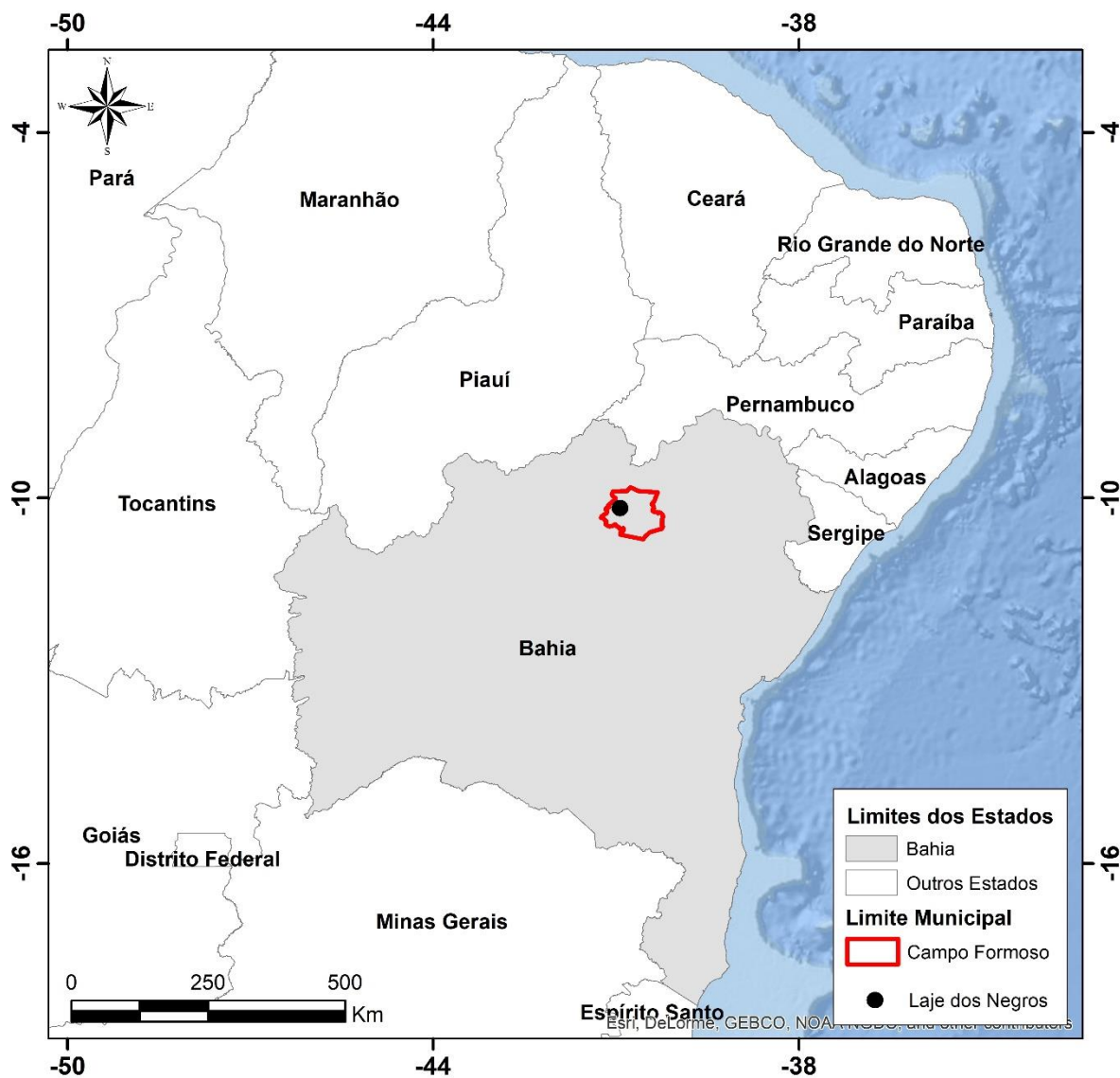


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo na região de Laje dos Negros - BA.

Capítulo II – Contexto geológico

2.1 – Geologia regional

A área de estudo está situada na Bacia de Irecê, na porção norte do Cráton São Francisco (ALMEIDA 1967, ALMEIDA 1977). A bacia constitui a principal ocorrência de rochas sedimentares de idade Meso e Neoproterozoica do cráton (Figura 2.1).

O Cráton São Francisco é uma grande massa de litosfera continental composta por várias unidades estruturais, formado por uma sucessão de eventos tectônicos como acreção crustal e/ou colisões continentais (BARBOSA *et al.*, 2003), no final do Paleoproterozoico. Segundo dados geológicos e geofísicos (USSAMI, 1993), o cráton é limitado por cinturões orogênicos brasileiros. Os limites a norte e nordeste correspondem a Faixa Rio Preto (INDA e BARBOSA, 1978), Faixa Riacho do Pontal e Faixa Sergipana (BRITO NEVES *et al.*, 2000), a oeste a Faixa Brasília (ALMEIDA, 1969) e a sul, a Faixa Araçuaí (ALMEIDA, 1977).

Em sua maior parte, o interior do cráton é coberto por unidades Pré-Cambrianas e Fanerozoicas, que incluem três grandes unidades morfotectônicas (ALKMIM, 2004). A feição morfotectônica da porção norte do cráton é o Aulacógeno do Paramirim (MOUTINHO DA COSTA e INDA, 1982) e seus limites norte e sul correspondem aos limites do cráton. O aulacógeno é preenchido pelas unidades Supergrupo Espinhaço e Supergrupo São Francisco, que são de idade Meso e Neoproterozoica, respectivamente. O Supergrupo Espinhaço é representado pelo Grupo Paraguaçu e pelo Grupo Chapada Diamantina, este último subdividido pelas Formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu.

A Bacia de Irecê (Figura 2.2), onde se encontra a área de estudo, foi preenchida pelos sedimentos do Supergrupo São Francisco, representado pelo Grupo Una, subdividido pelas Formações Bebedouro e Salitre. A deposição inicial do Grupo Una está relacionada a um evento glacial de âmbito continental em torno de 1.0 Ga (BARBOSA *et al.*, 2003). Como resultado da deglaciação, ocorreu a subida do nível do mar e inundação da maior parte do cráton, implantando importantes plataformas carbonáticas.

A deposição da Formação Bebedouro ocorreu em ambiente glácio-marinho (GUIMARÃES e DOMINGUEZ, 1995) em discordância sobre o Grupo Chapada Diamantina, composta por diamictitos, siltitos calcíferos e pelitos (LEÃO e DOMINGUEZ, 1992). A sequência carbonática da Formação Salitre foi depositada em um sistema marinho raso, e é composta por finas intercalações de rochas siliciclásticas e margas (LEÃO e DOMINGUEZ, 1992; ENNES-SILVA *et al.*, 2016). A formação é dividida nas unidades Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê (Figura 2.3).

A Unidade Nova América é composta por calcilutitos laminados e por calcarenitos (PEDREIRA *et al.*, 1985). Os calcilutitos possuem coloração variada e estrutura *mud supported* com matriz micrítica e cimento espático (PEDREIRA *et al.*, 1985; LEÃO e DOMINGUEZ, 1992). Nos calcarenitos há presença de oncólitos, pelóides e intraclastos (PEDREIRA *et al.*, 1985).

A composição da Unidade Gabriel são calcilutitos, calcissiltitos e calcarenitos finos e podem conter corpos de dolomito (PEDREIRA *et al.*, 1985). Apresentam coloração rosa, creme e cinza claro (PEDREIRA *et al.*, 1985; LEÃO e DOMINGUEZ, 1992).

A Unidade Jussara é composta por intercalações de calcarenitos e calcilutitos, e apresentam coloração cinza escura a negra (PEDREIRA *et al.*, 1985; LEÃO e DOMINGUEZ, 1992). Nessa unidade foram encontrados estromatólitos colunares de pequeno porte (PEDREIRA *et al.*, 1985)

A Unidade Irecê corresponde ao topo da Formação Salitre, onde predominam calcilutitos laminados variando para calcarenitos fino a médio de cor cinza escura a negra (PEDREIRA *et al.*, 1985; LEÃO e DOMINGUEZ, 1992). Apresentam intercalações de margas, siltito e arenitos imaturos (PEDREIRA *et al.*, 1985).

2.2– Geologia local

A Pedreira Sal, nordeste da bacia de Irecê, fica próxima ao sistema de cavernas da Toca da Boa Vista e da Toca da Barriguda (TBV-TBR) (Figura 2.2). Esse é o maior sistema de cavernas da América do Sul que ocorre na formação Salitre (KLIMCHOUK *et al.*, 2016). Na Pedreira Sal afloram rochas carbonáticas de coloração cinza à bege,

com laminação plano paralela e presença de estilólitos, sets de juntas, *boudins* de *chert* (SANTOS, 2016).

Nas sequências estratigráficas da Formação Salitre expostas nas cavernas e na área de estudo foram identificadas sete fácies distintas, cinco delas descritas por SANTOS (2016), que correspondem as fácies 1, 2, 3, 4 e 5. KLIMCHOUK *et al.* (2016) descreveram as fácies 6 e 7 (Figura 2.4). A pedreira é a parte superior da fácies 7. Assim, da base para o topo, a fácies 1 é composta por *grainstone* cinza-esbranquiçado com estratificações cruzadas e plano- paralelas. A fácies 2 sobreposta, constitui uma camada de *grainstone* de mesma coloração e granulometria menor. A fácies 3 é composta por *mudstone* cinza-amarelado a branco, finamente laminado, estromatolitos colunares e trombolitos, enquanto a fácies 4 é predominantemente siliciclástica, constituída de um siltito de coloração avermelhada. A composição da fácies 5 é um *grainstone* acamadado com intercalações de sílex. A fácies 6 é composta por carbonatos de coloração rosa intercalados com camadas descontínuas de folhelho escuro, e separando as fácies 6 e 7, uma pequena camada de xisto. Por fim, a fácies 7, objeto deste estudo, é constituída por argilas calcíferas laminadas, com vugs e lentes de sílex.

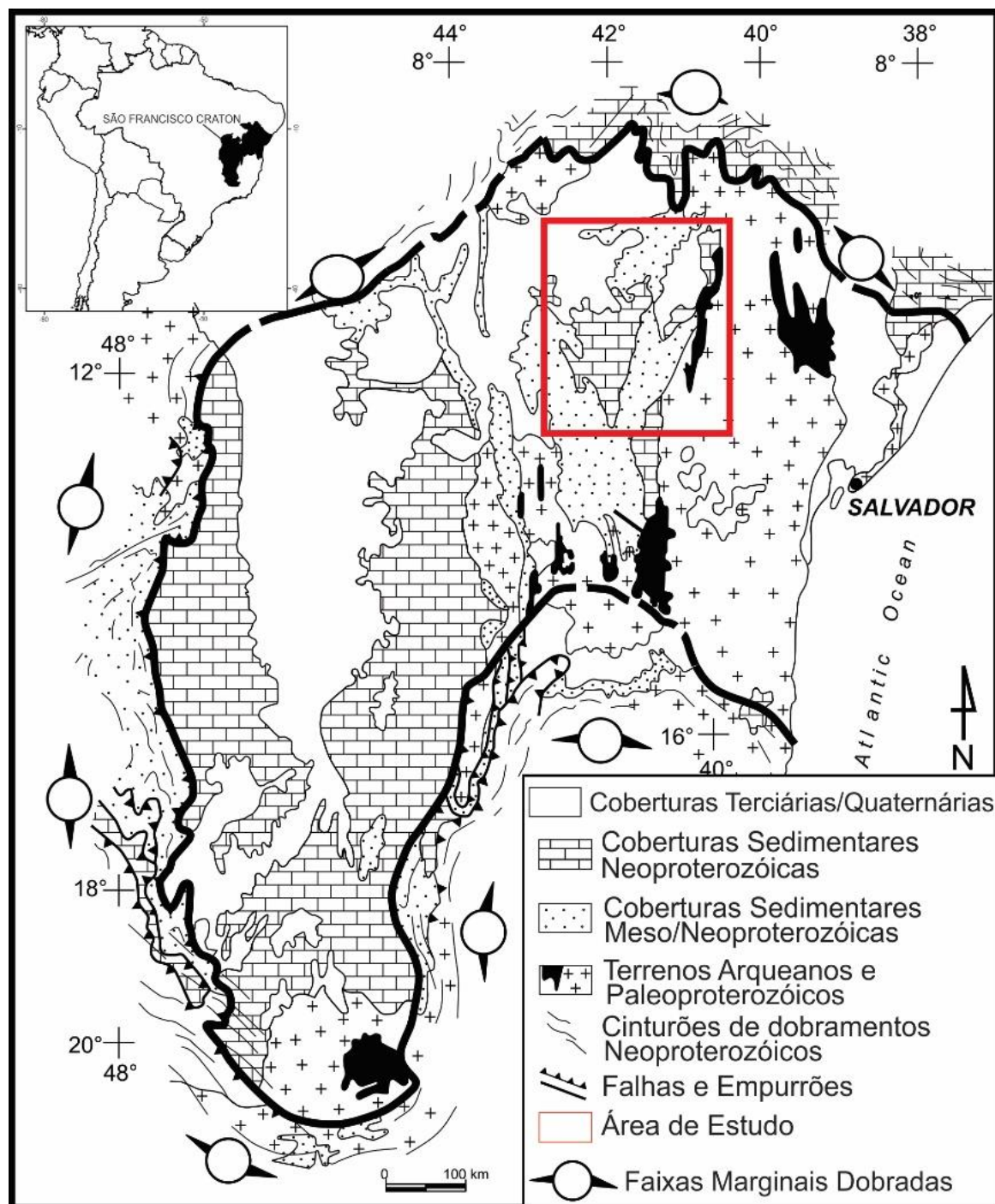


Figura 2.1: Mapa do Cráton do São Francisco mostrando os limites e as principais unidades estruturais. A poligonal em vermelho destaca a localização da Bacia de Irecê (Adaptado de BARBOSA et al, 2003).

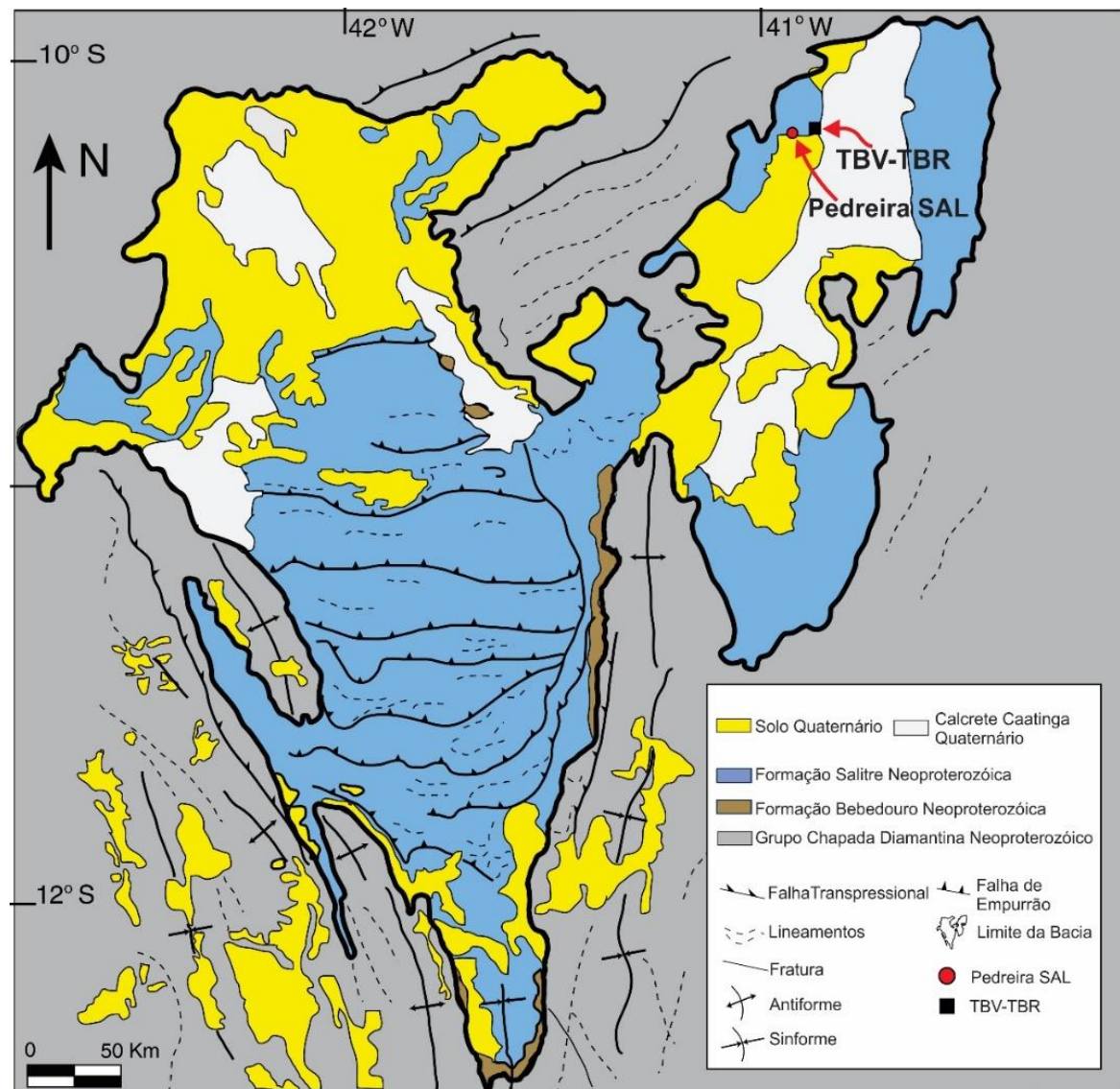


Figura 2.2: Mapa geológico da Bacia de Irecê com a localização da Pedreira Sal e o sistema de cavernas TBV-TBR (Adaptado de BORGES, 2016).

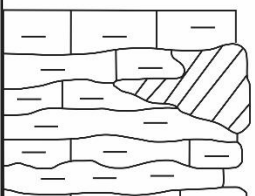
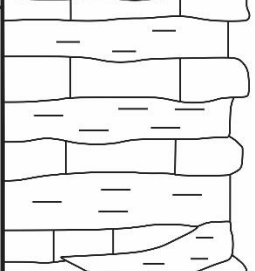
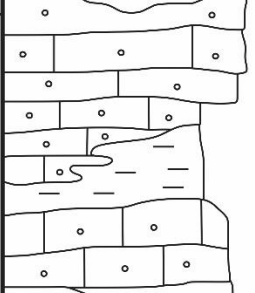
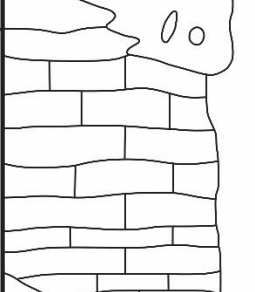
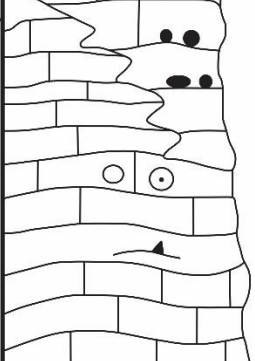
Ambiente de deposição	Unidades - Formação Salitre	
CONTINENTAL		
TALUDE DISTAL E PROXIMAL (TRANSGRESSIVO)		IRECÊ CALCILUTITOS, MARGAS, ARENITOS, SILTITOS E PELITOS
INFRAMARÉ (TRANSGRESSIVO)		JUSSARA CALCARENITOS ONCOLÍTICOS, CALCARENITOS QUARTOZOS, ARENITOS, ARCÓSEOS
INFRAMARÉ RASO A INTRAMARÉ (REGRESSIVO)		GABRIEL CALCILUTITOS E CALCARENITOS
INTERMARÉ A SUPRAMARÉ		NOVA AMÉRICA CALCILUTITOS E CALCARENITOS, TAPETES ALGAIS, FAIXAS E NÍVEIS DOLOMITIZADOS

Figura 2.3: Coluna estratigráfica da Formação Salitre (Retirado de PEDREIRA et al., 1985).

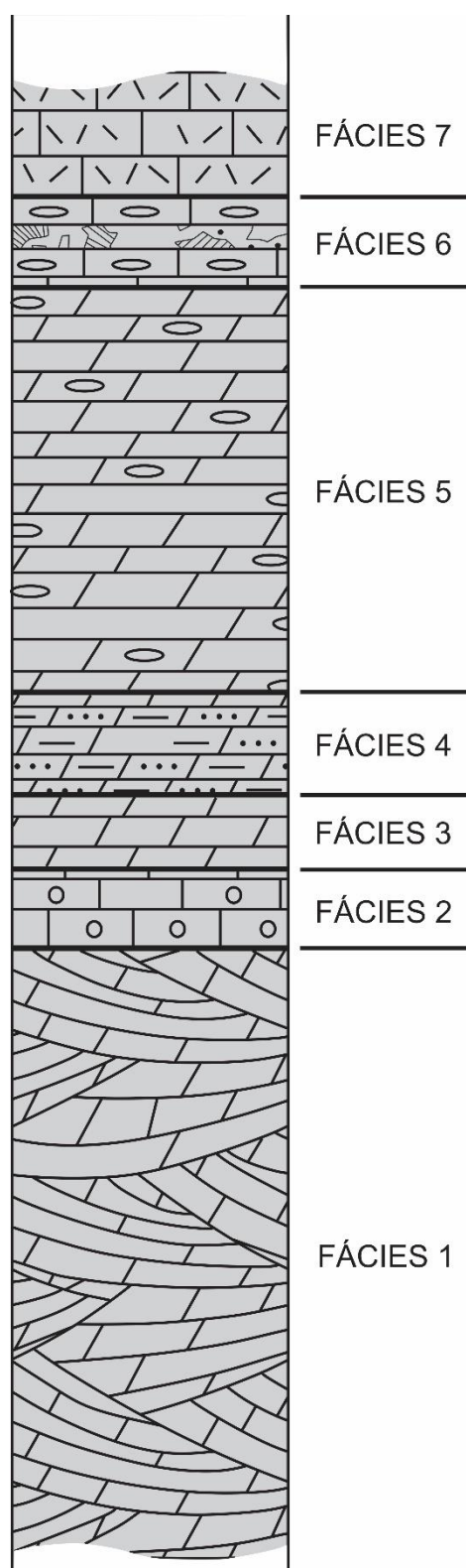


Figura 2.4: Fácies das sequências estratigráficas da Formação Salitre identificadas na Toca da Boa Vista e na área de estudo. A Pedreira Sal corresponde a parte superior da fácies 7. (Modificado de KLIMCHOUK et al., 2016).

Capítulo III – Materiais e métodos

3.1 – GPR

O GPR é um método geofísico não invasivo baseado na emissão de ondas eletromagnéticas no solo, capaz de imagear a subsuperfície em alta resolução (KEAREY, 2009). Os fundamentos do método estão na Teoria Eletromagnética e seu princípio de funcionamento é completamente descrito pelas equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde \vec{E} é o vetor campo elétrico (V/m), \vec{B} é o vetor densidade de fluxo magnético (T), \vec{H} é a intensidade de campo magnético (A/m), \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m²), \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico (C/m²) e q é a densidade de carga (C/m³).

A maneira de descrever a resposta de um material a aplicação de um campo eletromagnético se dá através das relações constitutivas:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Em que σ , ϵ , e μ representam a condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética, respectivamente, que são propriedades físicas do solo associadas ao uso do GPR (JOL, 2009). Elas descrevem os mecanismos de condução de corrente elétrica em meios geológicos que são de dois tipos: corrente de condução (\vec{J}_C) e corrente de deslocamento (\vec{J}_D). A razão entre essas duas correntes determina se o uso de GPR é viável ou não em um meio.

A corrente de condução (\vec{J}_C) tem como característica fundamental seu caráter dissipativo (Efeito Joule), e a corrente de deslocamento (\vec{J}_D) está relacionada ao fenômeno de polarização de dielétrico quando submetido a um campo elétrico.

Nos meios geológicos os dois mecanismos de corrente podem ocorrer concomitantemente, de maneira que a corrente elétrica total é dada por:

$$J = \vec{J}_C + \vec{J}_D \quad \text{Eq. 3.8}$$

A relação entre \vec{J}_C e \vec{J}_D define a tangente de perdas ($\tan\delta$), parâmetro muito importante na prospecção geofísica que ajuda a identificar ambientes geológicos dissipativo ou adequados ao uso do método GPR:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad \text{Eq. 3.9}$$

Quando a tangente de perdas é igual a 1, significa que as duas correntes são equivalentes. Para que o uso de GPR seja eficaz é necessário que a tangente assuma valores bem menores que 1, onde o regime de propagação da onda eletromagnética domina sobre o de difusão do campo.

O método GPR baseia-se na propagação da onda eletromagnética, e por essa razão é considerado por alguns autores como um método à parte (KEAREY, 2009). Tradicionalmente, os métodos eletromagnéticos trabalham com difusão do campo eletromagnético.

O GPR trabalha com o registro do tempo de viagem de ondas eletromagnéticas, com frequências entre 1 MHz e 1 GHz (OLIVEIRA, 2001) (Figura 3.1). Um sistema básico é composto por um gerador de sinal, uma antena transmissora (Tx), uma antena receptora (RX) e uma unidade de controle digital (REYNOLDS, 1997). A antena transmissora emite um pulso eletromagnético que percorre o subsolo até encontrar um material com contraste de permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), também chamada de constante dielétrica (K), suficiente para que ocorram reflexões (OLIVEIRA, 2001). Estas reflexões são captadas pela antena receptora e enviadas para a unidade de controle digital. Na unidade de controle digital é realizada a medida do tempo duplo de propagação. A Figura 3.2A ilustra o princípio de funcionamento do GPR considerando um ambiente composto por dois meios geológicos com constantes dielétricas diferentes (K1 e K2). A Figura 3.2B ilustra um típico registro do tempo de propagação. Os eventos Aw, Gw e Rw indicam, respectivamente, os tempos de chegada da onda eletromagnética se propagando pelo ar, pela terra e após sofrer reflexões.

A profundidade de investigação do GPR depende da frequência utilizada no levantamento, quanto mais alta a frequência utilizada menor a penetração do sinal e maior a resolução (REYNOLDS, 1997; JOL, 2009). Depende também da condutividade do meio, onde a atenuação do sinal é maior em meios mais condutivos, e da permissividade dielétrica, que ocasiona as reflexões e refrações da onda pelos contrastes de impedância eletromagnética dos meios em que a onda se propaga (REYNOLDS, 1997; JOL, 2009; KEAREY, 2009).

3.1.1 – Aquisição e Processamento

O sistema GPR utilizado neste estudo, consiste em uma unidade de controle digital, odômetro, cabos de conexão e um par de antenas blindadas de 400 MHz (Figura 3.3). O equipamento utilizado foi o SIR 3000, fabricado pela Geophysical Survel Systems Incorporated (GSSI), configurado para adquirir um traço a cada 0,02

m, com janela temporal de 150 e 200 ns. A técnica de aquisição utilizada foi de afastamento comum, utilizando um odômetro para obter as distâncias de aquisição dos dados.

Foram adquiridas 14 seções GPR, totalizando 380 m de levantamento 2D. Duas malhas de aquisição 3D foram realizadas. Para a primeira malha (3D₁), levantamos 31 seções com espaçamento de 0,5 m entre elas e para a segunda malha (3D₂) 36 seções com espaçamento de 0,15 m, totalizando 765 m de seções 3D (Figura 3.4).

Os dados foram processados com base no trabalho de XAVIER NETO (2006) e utilizou-se o programa REFLEX 6.1.0 (SANDMEIER, 2000). O processamento tem como objetivo melhorar a razão sinal/ruído para extrair do conjunto de dados todas as informações de interesse (XAVIER NETO, 2006; FORTE e PIPAN, 2017). A Figura 3.5 ilustra a seção GPR L053 sem processamento (seção 53).

As etapas que compõe o fluxo de processamento utilizado neste trabalho são descritas a seguir (Figura 3.6).

- a) O ajuste do tempo zero corrige a diferença entre a marca do tempo zero e a primeira quebra dos traços GPR. Essa diferença se dá em razão do afastamento não nulo entre as antenas transmissora (Tx) e receptora (Rx). Estas diferenças ocasionam erros na posição dos alvos em subsuperfície (XAVIER NETO, 2006) e seu ajuste proporciona a correção desse efeito.
- b) O *dewow* consiste na aplicação de um filtro passa-alta que remove os componentes difusivos de baixa frequência unidos ao sinal de radar que causam saturação na seção de GPR (XAVIER NETO, 2006).
- c) *Background removal* é uma etapa do processamento que remove o efeito de indução eletromagnética entre as antenas (FERNANDES, 2011), que causa saturação de altas amplitudes no dado.
- d) Os ganhos corrigem parte dos efeitos de propagação que são impostos ao pulso eletromagnético (espalhamento geométrico, absorção, etc) (XAVIER NETO, 2006). O ganho aplicado nas seções foi o ganho *Energy Decay*. Antes da etapa de aplicação de ganhos, foi retirado das seções o ganho dado no equipamento.

- e) Migração: Cada ponto em uma interface atua como um espalhador de energia durante a propagação do sinal. A migração tem como objetivo refocalizar essa energia no ponto difrator, fazendo com que os refletores sejam posicionados corretamente em subsuperfície (XAVIER NETO, 2006). Neste trabalho, a velocidade de propagação foi determinada com base no ajuste de hipérboles.
- f) A filtragem tem como objetivo atenuar dos dados GPR bandas de frequência que não são de interesse e que estão associadas a transientes de alta ou baixa frequência (XAVIER NETO, 2006). O filtro utilizado neste trabalho foi do tipo passa-banda trapezoidal.

3.2 – Petrofísica

A petrofísica é definida por ARCHIE (1950) como o estudo das propriedades físicas das rochas em relação a distribuição de fluidos em seus espaços porosos. As propriedades petrofísicas utilizadas nesse trabalho foram: porosidade (ϕ), densidade (ρ) e permissividade dielétrica (ϵ).

A porosidade descreve o volume potencial de armazenamento de fluidos. É uma propriedade volumétrica fundamental da rocha (SCHÖN, 2014), que é expressa como uma fração de volume (adimensional) ou em porcentagem, dada por:

$$\phi = \frac{\text{volume de poros}}{\text{volume total}} \quad \text{Eq. 3.10}$$

A densidade é a razão entre massa e volume de um material, dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. 3.11}$$

A permissividade dielétrica caracteriza o deslocamento de uma carga elétrica em um material na presença de um campo elétrico (Eq. 3.6). A permissividade dielétrica relativa (ou constante dielétrica) é a razão entre a permissividade dielétrica de um material e a permissividade dielétrica do vácuo:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{Eq. 3.12}$$

3.2.1 – Medidas petrofísicas

A Petrobras cedeu 28 amostras de rochas carbonáticas coletadas na Pedreira Sal, extraídas com uma plugadeira portátil (Figura 3.7), além dos ensaios de porosidade e densidade. Foram coletadas amostras de rochas carbonáticas sãs e alteradas nas paredes da pedreira. As amostras de rochas sãs apresentam uma coloração azul acinzentada, enquanto que as amostras alteradas apresentam uma coloração bege com presença de estilólitos e fraturas.

Para efetuar as medidas de permissividade dielétrica das amostras, foram confeccionadas pastilhas de cada uma das 28 amostras com aproximadamente 1.5 mm de espessura (Figura 3.8). As leituras foram realizadas em um analisador de impedância/material modelo E4991A fabricado pela *Agilent Technologies* (Figura 3.9). O equipamento é composto por uma fonte de frequência, que varre um intervalo de 1MHz a 1GHz, e acoplado à fonte um acessório de teste para efetuar as medidas de constante dielétrica. Esse, emprega o método de placas paralelas, no qual dois eletrodos são separados por um dielétrico, neste caso a amostra de rocha, para formar um capacitor. O equipamento mede a capacitância criada no acessório de teste.

Para calibrar o equipamento foi utilizada uma amostra teste com 0,77 mm de espessura. A composição da amostra teste é o teflon que possui uma permissividade dielétrica igual a 2 F/m (EHRlich, 1953).

Apesar de obtermos valores de permissividade dielétrica em uma ampla faixa de frequência, para esta pesquisa selecionamos apenas os valores correspondentes a frequência de 400 MHz, que é a mesma frequência das antenas GPR utilizadas nesta pesquisa.

3.2.2 – Modelo de Índice de Refração Complexo (CRIM)

O Modelo de Índice de Refração Complexo (BIRCHAK et al., 1974) é um modelo petrofísico que relaciona a permissividade dielétrica relativa e a porosidade.

Rochas carbonáticas são materiais de baixa perda, onde podemos aproximar a permissividade dielétrica relativa a partir da velocidade da onda eletromagnética no

vácuo e da velocidade da onda eletromagnética estimada dos dados GPR (MOUNT e COMAS, 2014), dada por:

$$\varepsilon_r(b) = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad \text{Eq. 3.13}$$

Onde $\varepsilon_r(b)$ é a permissividade dielétrica relativa da rocha carbonática, c a velocidade da onda eletromagnética no vácuo e v a velocidade estimada a partir dos dados GPR. Neste estudo a velocidade dos dados GPR, foi obtida com base no ajuste de hipérboles.

Para converter a permissividade dielétrica em porosidade utilizamos o CRIM, que expressa a permissividade dielétrica relativa como:

$$\varepsilon_r^\alpha(b) = \phi S_w \varepsilon_r^\alpha(w) + (1 - \phi) \varepsilon_r^\alpha(s) + \phi(1 - S_w) \varepsilon_r^\alpha(a) \quad \text{Eq. 3.14}$$

Onde $\varepsilon_r(w)$, $\varepsilon_r(s)$ e $\varepsilon_r(a)$ são as permissividades dielétricas relativas da água, da rocha e do ar, respectivamente. A porosidade é dada por ϕ , e a saturação de água da amostra é S_w . E α é o fator de orientação do campo elétrico que varia de -1 a 1 (MOUNT e COMAS, 2014).

O valor da permissividade dielétrica relativa da água é 79,5 F/m e do ar é 1 F/m. O valor da saturação de água na amostra varia entre 0 e 1, onde 0 é o valor para amostra seca e que foi utilizado neste trabalho. O fator de orientação do campo elétrico (α) utilizado foi de 0,5 que é aceitável para a maioria dos materiais geológicos (BIRCHAK et al., 1974; MOUNT e COMAS, 2014). Os valores de permissividade dielétrica relativa da rocha ($\varepsilon_r(s)$) utilizados neste trabalho, foram obtidos fazendo a média dos valores de porosidade medidos nas amostras de plugs, para rochas são e alteradas.

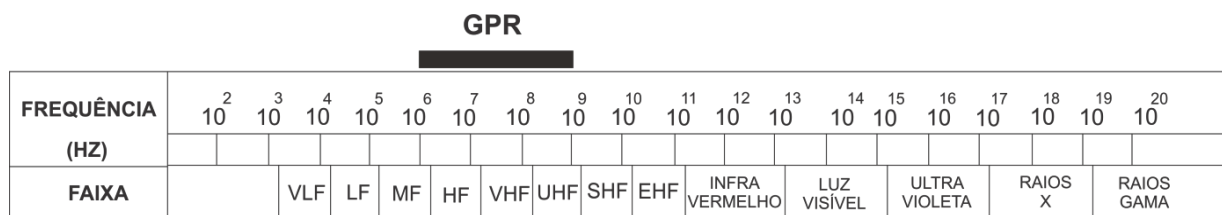


Figura 3.1: Espectro eletromagnético indicando a faixa de atuação do GPR (OLIVEIRA JR, 2001).

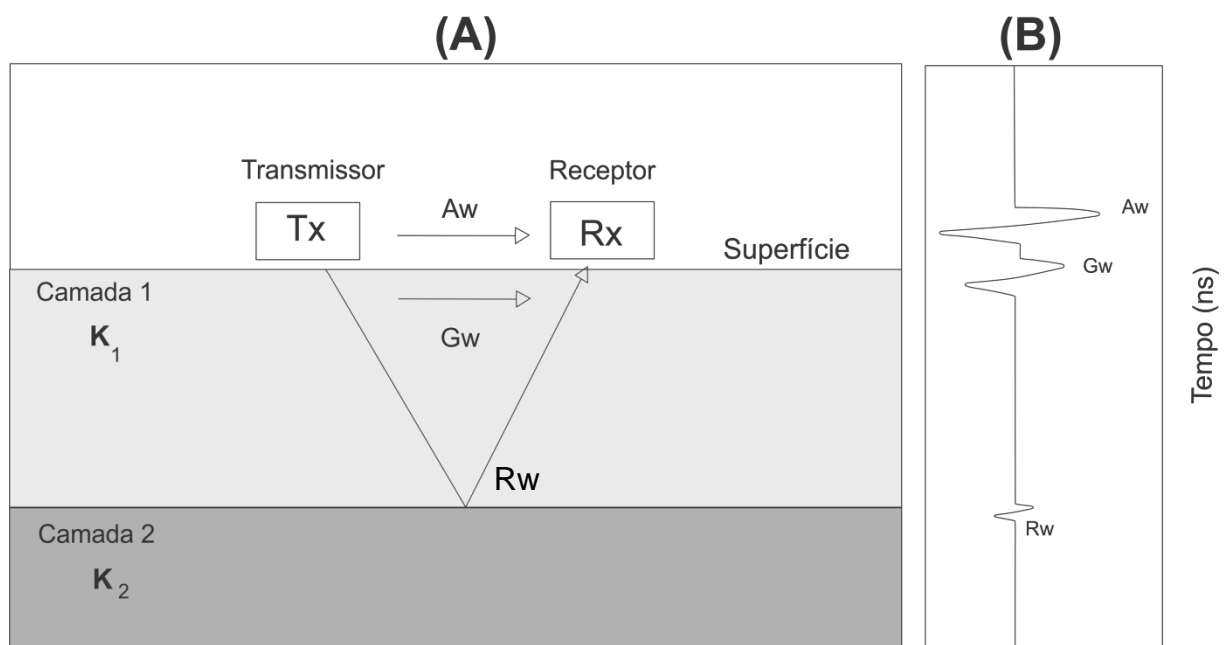


Figura 3.2: A: Princípio de funcionamento do GPR considerando duas camadas geológicas de constantes dielétricas diferentes (K_1 e K_2). B: Traço de GPR contendo registros dos tempos de chegada associados a onda direta pelo ar (A_w), onda direta pela terra (G_w), e reflexões (R_w) na interface das camadas 1 e 2 (OLIVEIRA JR, 2001).

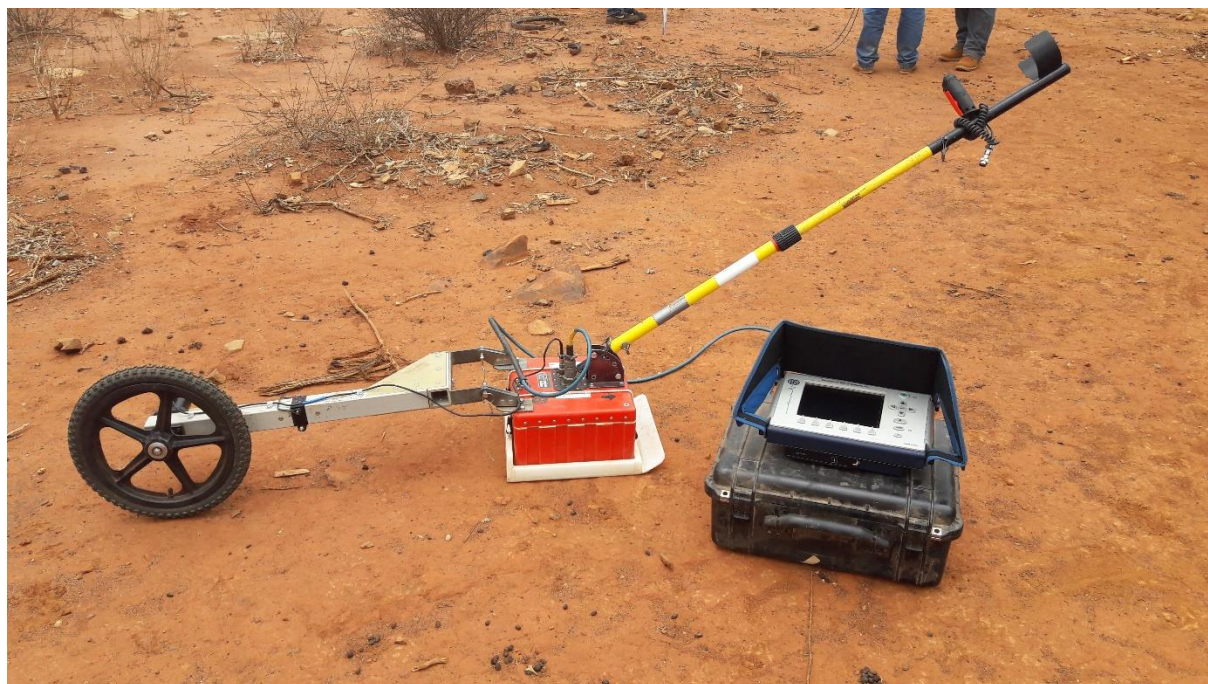


Figura 3.3: Sistema GPR utilizado na aquisição. Unidade central (SIR 3000), odômetro, cabos de conexão e um par de antenas blindadas de 400 MHz.

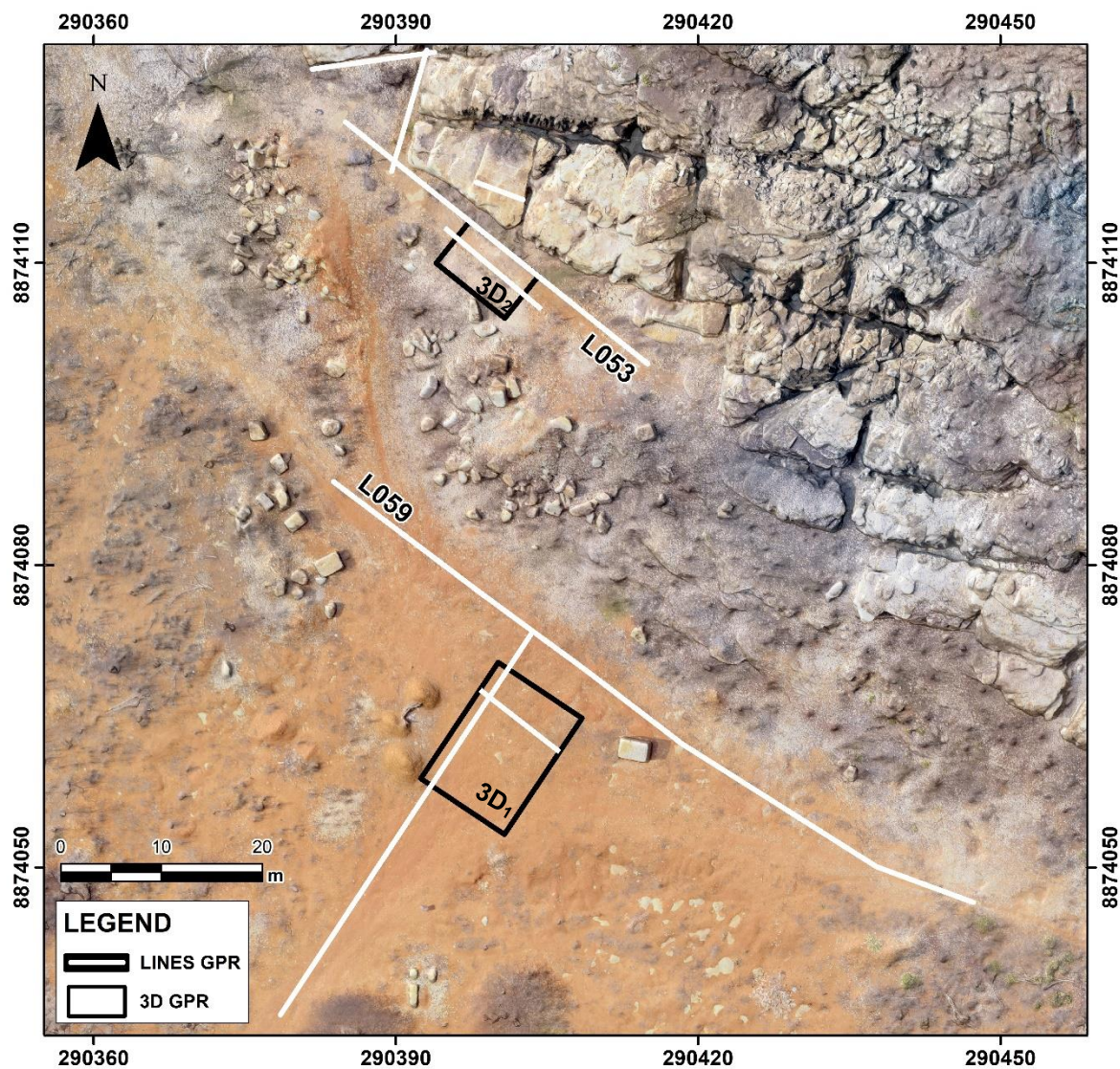


Figura 3.4: Mapa de localização do levantamento GPR na Pedreira Sal, com destaque para as linhas L053 e L059, discutidas no texto.

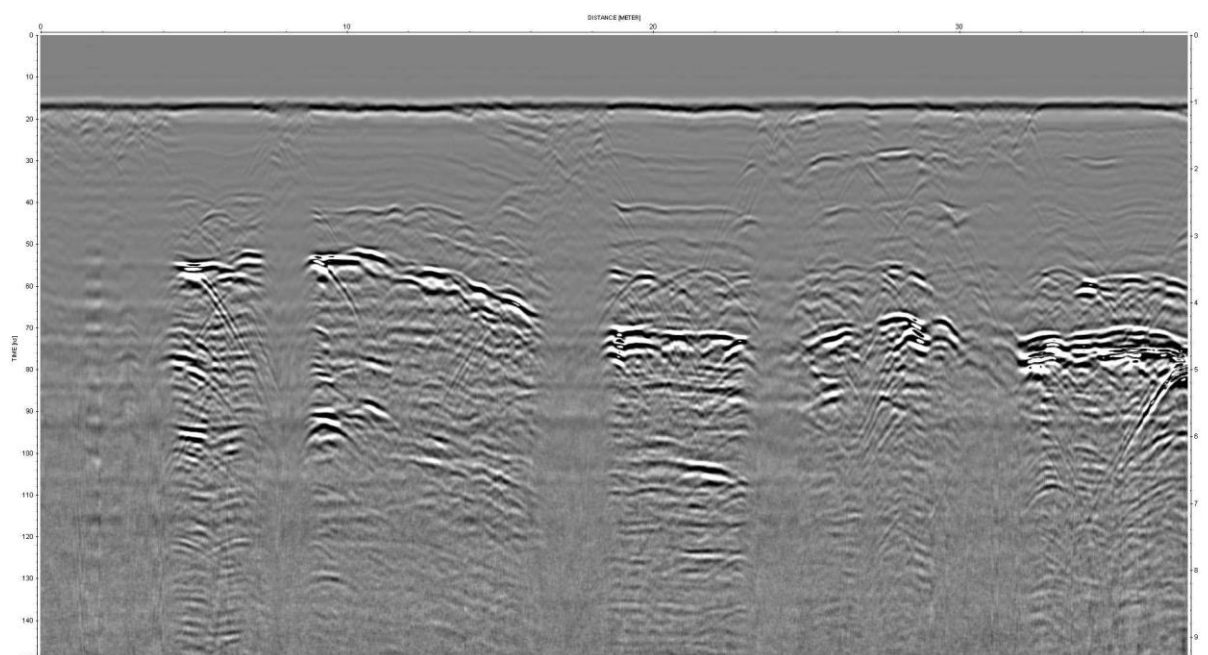


Figura 3.5: Seção GPR L053 não processada, adquirida com as antenas de 400 MHz.

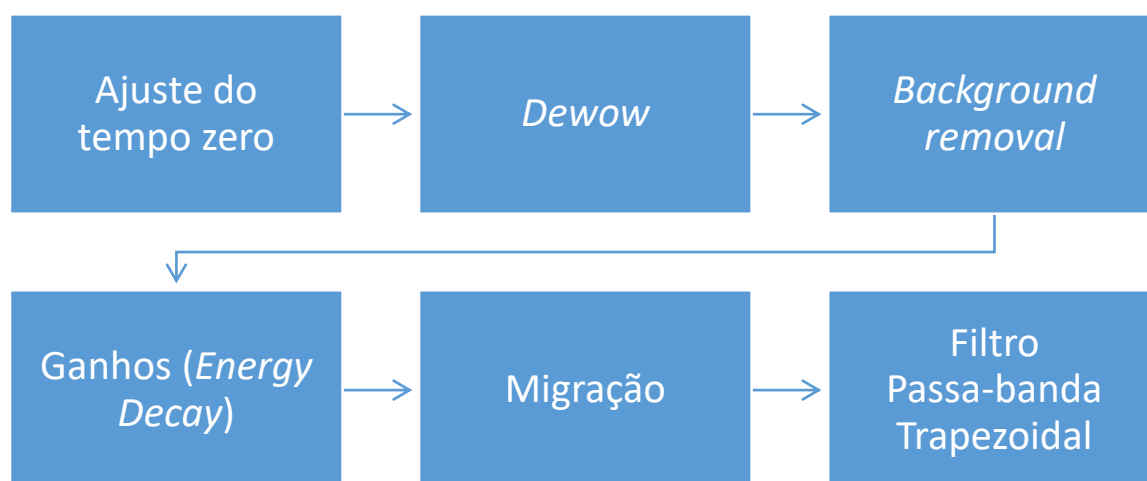


Figura 3.6: Fluxo de processamento dos dados GPR (baseado em XAVIER NETO, 2006).



Figura 3.7: Amostras de rochas carbonáticas da Pedreira Sal, analisadas neste trabalho.

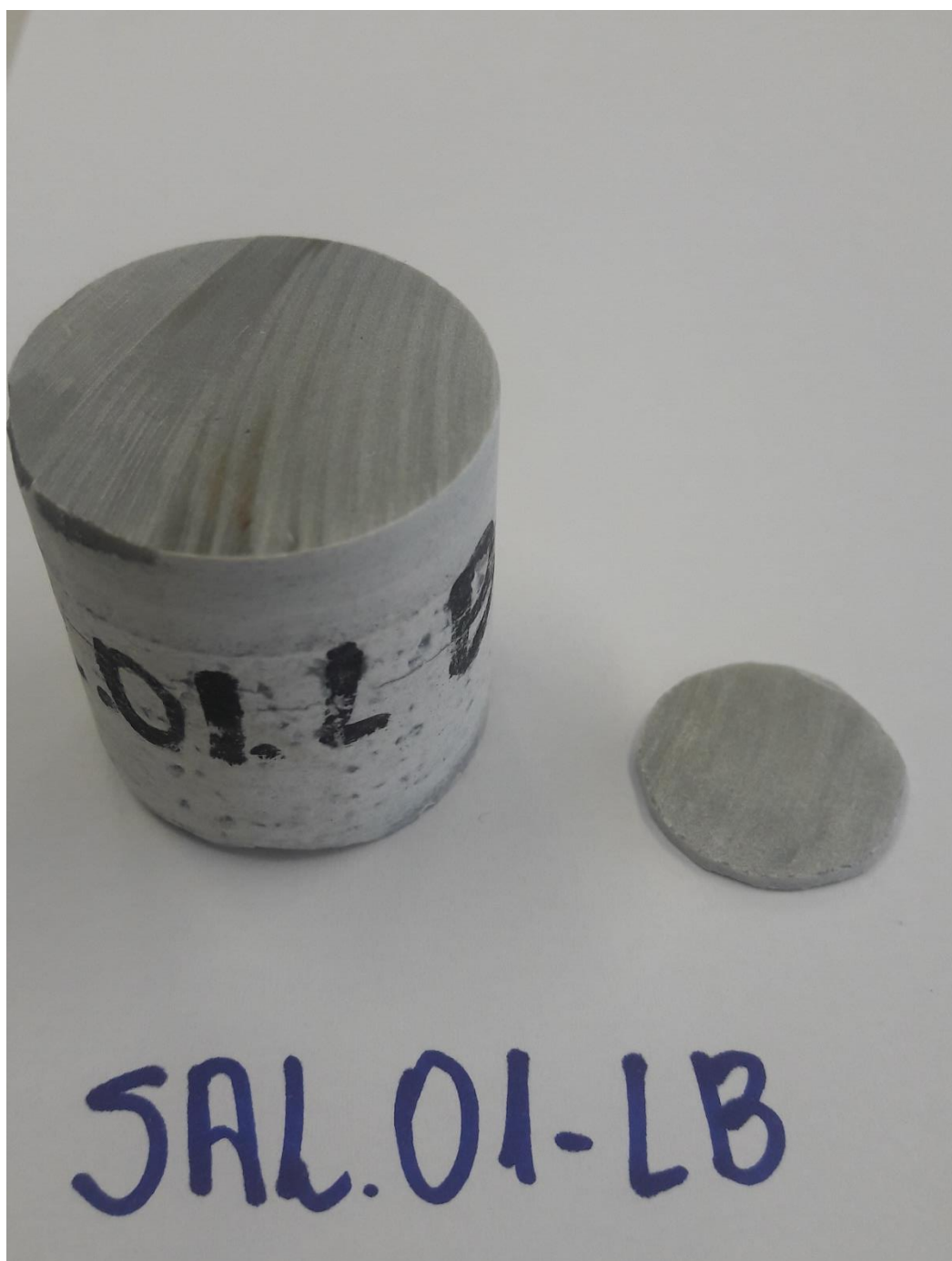


Figura 3.8: Amostra SAL.01-LB e sua respectiva pastilha de ~ 1,5 mm de espessura, serrada para medidas de permissividade dielétrica.

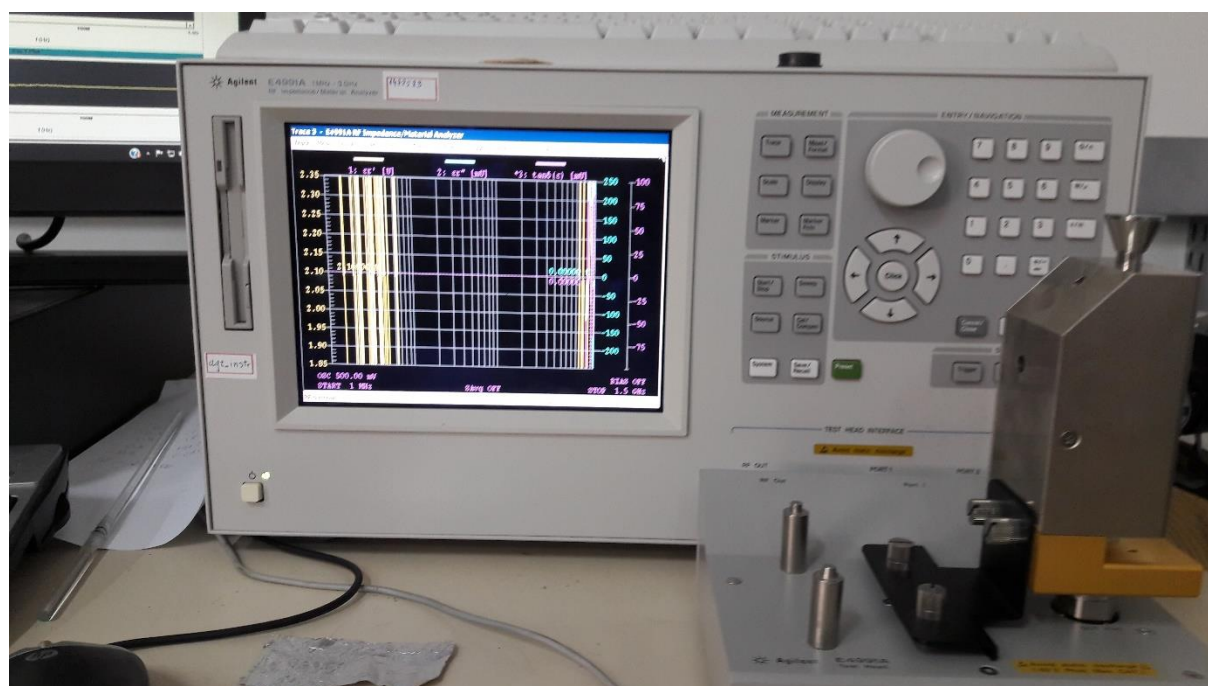


Figura 3.9: Analisador de impedância utilizado para efetuar as medidas da permissividade dielétrica.

Porosity Estimation and Geometric Characterization of Fractured and Karstified Carbonate Rocks using GPR Data in the Salitre Formation, Brazil

Iurianne M. M. Conti¹, David L. de Castro¹, Francisco H.R. Bezerra¹, Caroline L. Cazarin²

¹Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, 59078-970, Natal, RN, Brazil.

²Petrobras, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes), Av. Horácio Macedo, 950, Cidade Universitária, Rio de Janeiro 21941-915, RJ, Brazil.

Corresponding Author: David L. de Castro (david@geologia.ufrn.br)

Artigo submetido a Pure and Applied Geophysics em 22/06/2018.

Porosity Estimation and Geometric Characterization of Fractured and Karstified Carbonate Rocks using GPR Data in the Salitre Formation, Brazil

Abstract

Three-dimensional distribution of karstic zones and estimated porosity were obtained in fractured carbonate units of the Salitre Formation (Brazil) from GPR data. Low-amplitude (shadow) GPR zones could be associated with mineral dissolution halos that developed around fractures and bedding planes. GPR volumes show a 3D mazelike geometry of the vertical karstified carbonate zones, similar with the set of passages controlled by ~N-S and E-W oriented fracture system, observed on surface in unmanned aerial vehicle images.

Measurements in plug samples indicate that the mineral dissolution caused bulk density and dielectric permittivity rise and incipient decrease in porosity from 0.95% to 1.08%. These changes in the rock properties affect the EM impedance contrasts between carbonate bedding, causing loss of the reflected GPR signal. The correlation between dielectric permittivity and porosity could be analyzed using the complex refractive index model (CRIM), which is computed by EM velocity extracted from GPR data. The CRIM porosities are somewhat lower than plug sample porosities due to different measurement scales. However, the fact that porosity is slightly higher in the dissolved carbonates was maintained. In addition, GPR amplitude and frequency instantaneous attributes were used to estimate spatial variability in porosity throughout the whole GPR data volume. The crossplot of these two GPR attributes show that altered zones generally cluster in narrow ranges of instantaneous GPR amplitude and in broad range of instantaneous GPR frequency. Assuming empirical correlation between physical properties and GPR attributes two predicted porosity volumes were established for the karstified carbonates in the studied area.

Keywords: Karst, Carbonates, Fractures, Porosity, Dielectric Permittivity, GPR

1. Introduction

Carbonates are typically low primary porosity and permeability rocks (e.g., Agosta et al., 2010). Therefore, secondary porosity and permeability are generated by mineral dissolution (karstification), which is partly controlled by fractures and play a major role in hydrocarbon and ground water storage (Amthor and Friedman, 1991; Lonergan et al., 2007; Questiaux et al., 2010). Dissolution along fractures creates secondary porosity in carbonate

rocks, consisting of mega-porosity (centimeter to meter scale), represented by caves, vugs and cavities, and matrix porosity (less than millimeter) (Lucia, 2007). However, an important degree of uncertainty exists in understanding the geometry of fractures and the related secondary porosity in carbonates units. The complex origin and geometry of secondary porosity generated by mineral dissolution makes the modeling of fractured and karstified reservoir a difficult task (Billi, 2005; Agosta et al., 2010). Despite its importance, investigation of porosity in oil reservoirs have been limited to core samples, making it difficult to investigate how preexisting fracture network influence dissolution and the geometry of secondary porosity system. In addition, 3D seismic data do not have sufficient resolution to detect closely spaced dissolution along fractures spaced a few meters apart. The GPR method has been used to bridge the gap between natural examples of reservoir stratigraphic geometry at interwell scale (few to hundreds of meters) and indirectly petrophysical properties (e.g., Gawthorpe et al., 1993; Loucks et al., 2004; Harbi and McMechan, 2011; Reis Jr. et al., 2014; Fernandes Jr. et al., 2015). 3D high-resolution GPR images in outcrop analogs provide detailed information about depositional, structural, and karstic features, whereas GPR attributes contribute for estimating porosity and permeability by means of geostatistical relationships (e.g., Corbeanu et al., 2002; Mount et al., 2014). Recent studies (e.g., Tronicke and Paasche, 2016) have also correlated GPR signal parameters (energy, velocity, attenuation) to physical properties (dielectric permittivity, electrical conductivity) allowing detailed prediction of 3D distribution of petrophysical properties, including porosity, permeability, water saturation, and clay content, in outcrop analogs. However, the models derived from investigation of many natural examples are still a matter of debate.

This study investigates the geometry and attributes of porosity associated with karst driven by fractures in the Precambrian Salitre Formation, São Francisco Craton, in Brazil (Fig. 1), which we used as a carbonate reservoir analog. The investigated area hosts the longest cave system in South America and one of the oldest caves in the world (Auler and Smart, 2003; Klimchouk et al., 2016; Auler et al., 2017). The karstification is associated with a pervasive dissolution along fractures and sedimentary bedding in the region. In the present study, we focused on the following points using GPR data: (1) the 3D geometry and volumes of fractured and altered zones; and (2) the correlation among GPR attributes, physical (dielectric permittivity and density) and petrophysical (porosity) data to estimate secondary karst porosity in the low-porosity carbonate units in the Precambrian Salitre Formation. Our results indicate that mineral dissolution along the fractures modified physical and

petrophysical properties of the carbonate rocks, creating amplitude shadow zones in the GPR data. Mapping this GPR pattern we are able to characterize the 3D spatial distribution of the altered zones and, using GPR attributes, to estimate porosity in the studied carbonate rocks.

Fig. 1. Geological maps of the São Francisco Craton (A) and the Irecê Basin (B) in East Brazil, with location of the studied quarry near the Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda (TBV-TBR) cave system.

2. Geological Setting

The studied site is located in the São Francisco Craton, a large mass of Paleoproterozoic continental lithosphere surrounded by Neoproterozoic Brasiliano orogenic belts (e.g., Brito Neves and Cordani, 1991; Almeida et al., 2000). An extensive carbonate platform overlies the cratonic and surrounding areas during a Paleoproterozoic transgression of an epicontinental sea (Misi and Kyle, 1994). The Irecê Basin represents a relatively small and isolated tectonic unit of the ancient carbonate platform, situated in the northern part of the São Francisco Craton (Fig. 1).

An overspread karst system developed in the up to 1000-m thick marine limestones and dolomites of the Salitre Formation. Carbonate units in this study are composed of grainstones and mudstones intercalated with fine siliciclastic and marl layers, which are fractured and gently folded by Precambrian tectonic and hydrothermal events, which controlled the mineral dissolution. Karstification mainly occurred along two major sets of fractures, which strike ~N-S/NNE-SSW and E-W (Ennes-Silva et al., 2016).

The dolomitized mudstones and laminites of the Salitre lithostratigraphic unit are exposed in a small quarry near the giant cave system called Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda (TBV-TBR) (Figs. 1 and 2a). The TBV-TBR caves comprise over 145 km of passages located in the vicinity of major a NE-SW-oriented thrust fault (Auler et al., 2017). Two sets of fracture increased the fracture permeability and facilitated the rising of ascending fluids (Ennes-Silva et al., 2016). Fluid flow enlarged fractures in a selective manner and created large conduits of dissolution, which range in size from millimeter-scale dissolution features to 10-m wide cave passages (Fig. 2b). More recent weathering affected the carbonate rocks in the quarry, producing incipient alteration halos of beige color mainly around fractures and bedding planes (Klimchouk et al., 2016). Meteoric water caused dissolution and leaching of organic matter and its substitution by iron hydroxide (limonite).

Fig. 2. Karstic features controlled by NNE-SSW and E-W trending fracture system in the studied quarry with location of the GPR survey: A – unmanned aerial vehicle image with location of GPR lines; B – sub-vertical and orthogonal passage system and karstic cavities along sub-horizontal bedding.

3. GPR Survey

3.1. Data Acquisition and Processing

The GPR data were acquired using SIR-3000 equipment (GSSI Inc.) with 400-MHz antennas and time windows of 150 and 200 ns, which allowed us to map karst features and host rocks as deep as 6.0 m, with an estimated vertical resolution of 0.02 m between successive reflections. The GPR traces were equally spaced at 0.02 m, controlled by an odometer. The survey contains a total of 380 m of GPR 2D lines and 765 m of lines distributed in two regular grids (3D), acquired perpendicular and parallel to the NNE-SSW and E-W trending fracture system (Fig. 2a). The spacings between adjacent GPR 3D lines were of 0.5 m and 0.15 m.

Processing of the GPR data included trace editing, time zero correction, background removal, dewow filtering, energy decay gain, bandpass filtering, and diffraction stack time migration. An average velocity of 0.075 m/ns was used for diffraction stack migration, calculated from diffraction hyperbolas in the GPR profiles (Fig. 3). No leveling correction was applied since the terrain is fairly flat. In addition, a pseudo-relief attribute that combines the Hilbert Trace attribute with the Energy attribute (Reis Jr et al., 2014) was applied to enhance lateral variation in GPR facies. The result of the GPR data processing is exemplified in the profile L053 (Fig. 4), in which amplitude shadow zones occur either mainly verticalized, with a few meters wide, or horizontalized and broader (light blue areas in Fig. 4). The reflections are plane-parallel, gently undulating and laterally truncated, exhibiting the thin carbonate bedding, affected by sub-vertical fractures and gentle folds. Fernandes Jr. et al. (2015) identified amplitude shadow zones in GPR profiles and associated them with karst structures mapped in a large carbonate outcrop of the Cretaceous limestone formation in Potiguar basin (NE Brazil). According to them, empty voids or filled with clay soil are the probable source of the GPR amplitude loss.

Fig. 3. GPR profile L053 (location in Figure 2a) showing hyperbolic diffractions highlighted with associated estimated EM velocities in m/ns.

Fig. 4. GPR signature of the fractured and altered carbonate unit (low amplitude zones) in the studied quarry. The location of the Profile L053 is in [Figure 2a](#). Rectangles highlight areas where karstic features, shown in [Figure 5](#), are identified in the GPR data.

The amplitude shadow zones have direct correlation with hypogenic karstic structures present in the quarry and dissolution halos around fractures and carbonate bedding caused by weathering ([Figs. 4 and 5](#)). In hypogenic karsts, the fluids that cause the alteration in the carbonate rocks ascend vertically by fractures until they find low-permeability barriers or baffles, inducing a horizontal flow ([Klimchouk et al., 2016](#)). In this way, the karstic zones are preferentially vertical or horizontal. In turn, the downward flow of meteoric water also causes karstification, taking advantage of the same system of fractures and bedding. In the studied quarry, the weathering yielded dissolution halos shown in [Figures 5b and 5e](#). Dissolution changes the mineral content (e.g., dolomitization and limonitization), porosity and permeability of the rock, without, however, substantially modifying the original bedding. The electrical properties, including dielectric permittivity, are also altered, creating low-amplitude reflections due to decrease in reflection coefficients and EM impedance contrasts between bed interfaces. We are taking advantage of these distinct GPR pattern to map the karstic zones in three dimensions and using GPR complex trace attributes to estimate their average porosity based on measurements in plug samples.

Fig. 5. Karstic features exposed in the studied quarry and identified in the GPR profile ([Fig. 4](#)): sub-vertical fracture-controlled cavities (A, C and F); non-altered (blue gray) and altered (beige) carbonate zones (B and E) along fractures and bedding planes; and sub-horizontal cavities along bedding planes (C).

3.2. GPR Attributes

Complex trace attributes have been used to estimate the relationships between seismic (e.g., [Taner et al., 1979](#); [Robertson and Nogami, 1984](#)) or GPR ([Corbeanu et al., 2002](#); [Harbi and McMechan, 2011](#)) data and physical properties of the subsurface. Instantaneous amplitude and instantaneous frequency are a robust measure of the energy and frequency in the trace at a given time and contain information of petrophysical property as porosity. Thus, we computed these two GPR attributes to identify the dissolved zones (alteration halos of beige color – [Figs. 2 and 5](#)) and estimate its porosity indirectly related to changes in the dielectric permittivity of the altered carbonate rocks. The 3D GPR data and its attributes ([Fig.](#)

6) provide a detailed view of the karstic zones in the studied quarry. The low amplitude coherent responses in the GPR and instantaneous amplitude correlate quite well with vertical and horizontal altered zones observed in the carbonate rocks exposed in the quarry (Figs. 2, 5, 6a and 6b). Although the instantaneous frequency shows no obvious GPR pattern of the dissolved areas (Fig. 6c), the frequency content is mainly controlled by contrasts in petrophysical properties and sedimentary features (Corbeanu et al., 2002). In particular we expect no geometric change in the original stratigraphy, but the mineral dissolution should occur preferentially in areas with higher concentrations of fractures, karstic features, stylolites and primary porosity, interfering in the frequency content.

Fig. 6. Three-dimensional view of the GPR data set (A) and Instantaneous Amplitude (B) and Frequency (C) attributes, showing the amplitude shadow zones associated to dissolved areas.

Thus, we combined instantaneous GPR amplitude and frequency attributes to improve the estimation of relative dielectric permittivity and porosity in three dimensions. The crossplot between normalized instantaneous amplitude and instantaneous frequency attributes extracted from GPR traces show that low-amplitude (shadow) zones generally cluster in narrow ranges of instantaneous GPR amplitude and have a large instantaneous GPR frequency dispersion (rectangle 'a' in Fig. 7). On the other hand, non-altered carbonate rocks show a well-defined distribution in high-amplitude and low-frequency intervals (rectangle 'b' in Fig. 7). The high frequency content is mainly caused by lateral discontinuities (fractures and dissolution structures) more common in the alteration halos. In turn, higher amplitudes are concentrate in the low frequency range (< 0.25 Hz), suggesting that the dissolution causes more loss of EM impedance than modifications in reflection geometry.

The frequency/amplitude distribution within the clusters 'a' and 'b' in the crossplot of Figure 7 allows us to define a stochastic criterion for identifying karstic zones in the 3D volumes. In a conservative estimation, regions with normalized instantaneous amplitude greater than 0.5 can be correlated to non-altered carbonate rocks. A more comprehensive choice can include a larger range of amplitudes (> 0.35) assigned to be non-altered zones. We discuss these hypotheses next chapter, associating GPR attributes with measured relative dielectric permittivities and porosities.

Fig. 7. Crossplot of the normalized Instantaneous Amplitude (NIA) and Frequency (NIF) attributes, showing the two clusters of altered (a) and non-altered (b) carbonate populations.

4. Rock Properties and Porosity Prediction

4.1. Plug Samples

Physical (relative dielectric permittivity and density) and petrophysical (porosity and permeability) measurements were performed on 28 plugs extracted from fresh carbonate rocks and alteration halos in the studied quarry face at approximately the same stratigraphic position. The bulk density was calculated as the dry weight of the sample divided by its volume. A displacement method was used to measure effective porosity, submerging the dried samples in a water-filled tank and applying constant vacuum to eliminate bubbles. Effective porosity is proportional to all the water displaced by the sample and measured in a graduated cylinder. Permeability measurements were obtained using an electronic probe permeameter, whose values are in milli-Darcy (mD). However, permeability data show no consistent values and were not considered in the present study. Finally, the samples were cut into ~1.5 mm thickness slabs for relative dielectric permittivity measurements using a high-precision impedance analyzer. Measurements of real and imaginary parts of the sample permittivity were made for the 400 MHz frequency to obtain dielectric data for the same GPR antenna frequency used in the field work.

We selected four samples of clearly non-altered carbonate rock and eight samples from the beige color altered halos (Tab. 1) to analyze how weathering dissolution affected the rock properties and to provide parameters for GPR correlation and porosity estimation. Although changes in mineral and textural contents are quite incipient in the plug samples, subtle variations occur in physical and petrophysical properties due to dissolution. In the altered zones, average density and average relative permittivity decrease from 2714 to 2713 kg/m³ and from 7.36 to 6.81, respectively (Tab. 1). In contrary, the average porosity increases from 0.95% to 1.08% in the altered rocks. An inverse correlation between density and porosity is consistent since the presence of pores caused by dissolution reduces rock density. In fact, the 12 analyzed plug samples provide a linear correlation coefficient of -0.478. Considering only the non-altered rocks, the linear correlation coefficient is higher ($R = -0.722$), indicating that the weathering affects rock density and porosity differently in somehow.

Table 1. Physical and petrophysical properties of carbonate rocks in the Sal quarry. ϕ : porosity in %, ϵ_r : relative dielectric permittivity, ρ : density in kg/m³.

The porosity and relative dielectric permittivity measured in the plug samples reveal more intrinsic mutual interactions (Tab. 1 and Fig. 8). The linear correlation coefficient is quite high ($R = 0.646$), but it reaches 0.999 when considered only non-altered samples. It indicates that the dielectric permittivity of the studied carbonate rocks depends largely on porosity. Other factors (i.e., mineral content, grain size, and water saturation) that also account for variation in bulk dielectric permittivity play a secondary role in our study case due to the incipient dissolution affecting the quarry rocks. Despite this slightly rock differences, the crossplot between relative dielectric permittivity and porosity (Fig. 8) shows two different correlation patterns related to non-altered and altered rocks. The altered samples generated a large dispersion of the relative dielectric permittivity and show a relatively higher porosity. The non-altered samples, in turn, show that both properties increase together more intensively. This result gives us confidence to predict the porosity distribution throughout the whole GPR data volumes based on the fact that GPR signal drastically depends on ground dielectric permittivity.

Fig. 8. Correlation between porosity (ϕ in %) and relative dielectric permittivity (ϵ_r) of the non-altered (green) and altered (purple) carbonate rock samples.

4.2. Porosity Estimation – CRIM

A classical method to estimate porosity from bulk relative dielectric permittivity (ϵ_{rb}) is the complex refractive index model (CRIM) (e.g., Endres and Knight, 1992; Cassidy, 2007; Mount et al., 2014). CRIM is a practical volumetric, petrophysical model that incorporates the complex effective permittivities of water ($\epsilon_{rw} = 79.5$), air ($\epsilon_{ra} = 1$) and rock (ϵ_{rs}), porosity (ϕ) and water saturation (S_w) (Birchak et al., 1974). A geometrical factor (α) takes into account the electrical field with respect to the internal rock geometry. Time domain reflectometry and GPR studies (e.g., Birchak et al., 1974; Mount et al., 2014) have assumed a value of 0.5 to most geologic materials in the GPR frequency range (100 – 1000 MHz). Moreover, considering low-loss conditions (i.e., low conductivity materials) the bulk relative dielectric permittivity (ϵ_{rb}) can be obtain dividing the EM wave velocity in a vacuum ($c = 0.3$ m/ns) by the EM velocity (v) (Daniels, 1996). EM velocities are usually calculated from diffraction hyperbolas in common offset GPR profiles or velocity analysis of common midpoint surveys. In this study, we found several hyperbolic diffractions within the GPR profiles, normally

associated with fractures, vugs and other karstic features (Fig. 3). An average diffraction velocity of 0.075 m/ns was estimated by fitting hyperbolic functions to the diffraction geometry in the GPR profiles, resulting in a bulk relative dielectric permittivity of 16 for the carbonate rocks in the studied quarry.

We applied the CRIM method to estimate porosity derived from EM velocities and compare with porosity measured in plug samples. We assumed a completely unsaturated carbonate rock ($S_w = 0$) above the water table (deeper than our GPR investigation depth up to 12 m) and used average effective permittivities of non-altered and altered rock (ϵ_{rs}) of 7.36 to 6.81, respectively (Tab. 1). The CRIM porosity estimates are 0.74% for non-altered rock and 0.80% for altered rock, which are consistent with measured average porosities of 0.95% and 1.08%, respectively. The bulk GPR porosity estimates are slightly overestimated by plug porosity measurements, but maintain the characteristic of increased porosity in the altered zones. These differences are expected due to the distinct nature of each particular method, scale of measurements and the heterogeneities within the carbonate rocks, and the presence of fractures and karstic features. However, the consistency of the results enables the use of the GPR data to estimate the porosities of the non-altered and altered zones in the studied quarry.

4.3. Porosity Estimation – GPR Attributes

A disadvantage of the CRIM method is the need for a fairly accurate velocity model to generate an acceptable estimated porosity volume. As in this study the velocities were only obtained in dispersed diffraction in the GPR survey, we chose to estimate porosities based on GPR attributes, as described in the previous Chapter 4. The subset image of the Profile L053 (Fig. 5) and its attributes provide a detailed view of the GPR response of the beige color altered halos (Fig. 9). The pronounced lateral loss in reflection amplitudes delineates the sub-vertical boundary of the karstic zone. The GPR amplitude contrast is even more evident in the normalized instantaneous amplitude image (Fig. 9c), in which amplitudes >0.5 are related to karstic zones. The instantaneous frequency image shows no clear pattern to discriminate both carbonate zones (Fig. 9d), although the frequency content of altered rocks varies in a large range as shown in the attribute crossplot (Fig. 7). Drawing two volumes of amplitude >0.35 and >0.5 leads to a representative model of the 3D mapping of relatively lower porosity ($\phi = 0.95\%$) non-altered (blue areas in Fig. 10) and relatively higher porosity ($\phi = 1.08\%$) altered zones and indirectly of estimate porosity variability. Although the estimated porosity cubes mimic the same mazelike pattern of sub-vertical dissolved zones, these porosity models are

clearly a quite simplified approximation because this petrophysical property was measured in a few locations on surface. Certainly, new porosity measurements in boreholes may improve the prediction of porosity from GPR data in the studied quarry.

Fig. 9. Altered halos along bedding planes associated with fractures in the carbonate rocks (A) and their GPR responses (B) and normalized instantaneous amplitude (C) and frequency GPR patterns (D).

Fig. 10. Predicted porosity cubes derived from GPR data. Blue areas represent lower-porosity, non-altered zones, where normalized instantaneous amplitude (NIA) is greater than 0.5 (A) or 0.35 (B). The plan view of the porosity cube is shown in C. A NIA profile (A and B) and a NIA time slice (C) show the higher-porosity, altered halos indicated by orange color (see the color table in [Figure 9c](#)).

5. Geometric Characterization of Altered Zones and Karstic Features

The studied quarry is located near the TBV-TBR cave system ([Fig. 1](#)). However, no cave is present in this area, only a system of passages spaced 1-3 m in width and 2-4 m in height along NNE-SSW and E-W oriented fractures ([Fig. 2](#)). On the other hand, more recent chemical weathering caused mineral dissolution and limonitization along the same conjugate fracture system and carbonate bedding ([Fig. 5](#)), which played as preferential pathways for the former karstification. Our GPR survey investigated an area affected by more incipient level of dissolution, comprising centimeter-scale karstic features and altered beige halos ([Figs. 4 to 6 and 9](#)).

The GPR profiles show sequences of sub-horizontal, and sub-parallel reflections, which are slightly undulated and sometimes dipping to SE ([Figs. 4 and 11](#)). Undulated and dipping reflections can be associated with gentle folding observed in the TBV-TBR cave system by [Klimchouk et al. \(2016\)](#). These authors related folds in the caves to the Brasiliano orogenic cycle that affected the Salitre carbonate units in the Neoproterozoic. Moreover, GPR shadow zones and centimeter-scale karstic features (vugs and small cavities) were able to be mapped in the GPR profiles ([Figs. 4 and 5](#)).

Fig. 11. GPR Profile L059 showing sub-vertical amplitude shadow zones, related with altered halos and karstic features developed around fractures (light blue areas), and slightly undulated sequences of reflections (red lines).

Sub-vertical amplitude shadow zones intercalated by sequences of high-amplitude reflections is the GPR pattern that unravel the spatial distribution of the altered halos in depth (Figs. 4 and 11). The amplitude shadow zones extend for more than 12 m depth, which is the maximum depth achieved by the GPR survey in the studied area. The distance between shadow zones and their widths vary from a few meters up to 25 m in the western part of the quarry (Fig. 11). In the NW portion of the Profile 059, the reflections are greatly attenuated, disappearing in depth. The strong amplitude loss of the GPR signal suggests that the intense weathering along sub-vertical fractures has caused depletion of the primary carbonate bedding by mineral dissolution.

The amplitude shadow zones show a mazelike distribution (Figs. 6 and 10) parallel to the NNE-SSW and E-W trending conjugate fractures observed in the quarry (Fig. 2). The plan view of the estimated porosity cube (Fig. 10c) depicts a set of sub-vertical zones of higher-porosity altered beige halos surrounded by non-altered carbonate rocks (blue areas in Fig. 10c). The NNE-SSW trending zone crosses the ~E-W oriented zone, forming a larger area in the intersection. A third narrow zone occurs at the NE edge of the volume with a NE-SW direction. It is noteworthy that the same spatial distribution of these karstic zones is present in the set of passages in the quarry (Fig. 3), suggesting that the conjugate fracture network controlled both the regional karstification events, which affected thick carbonate sequence of the Salitre Formation and generated the cave system, and the more recent weathering, which provoked the mineral dissolution close to the surface.

6. Discussions

Processes of fracturing, karstification and speleogenesis play a fundamental role to create secondary porosity and permeability in carbonate reservoirs (e.g., Amthor and Friedman, 1991; Harbi and McMechan, 2011). GPR method has been used in last decades to map 3D distribution of these petrophysical properties in interwell scale, correlating measurements in core and plug samples, EM velocity analysis and GPR attributes (e.g., Corbeanu et al., 2002; Mount et al., 2014). We evaluated this approach in an exposure of an intensively karstified Neoproterozoic carbonate formation in the São Francisco Craton (East Brazil). This region comprises the longest cave system in South America with at least three major speleogenetic phases affecting the lithostratigraphic units (Klimchouk et al., 2016). More recent chemical weathering provoked additional mineral dissolution in shallow units of the carbonate formation.

6.1. 3D Porosity Estimation

Porosity is a key parameter for the estimation of fluid volume in reservoir characterization (Forster et al., 2004; Harbi and McMechan, 2011). In outcrop scale, 3D porosity distribution can be predicted from GPR data calibrated by porosity measured from rock samples. We used two approaches to establish the relationships between them in the studied quarry: a) CRIM petrophysical modeling; and b) GPR instantaneous attributes. The CRIM derived porosities for the non-altered (0.74%) and weathered (0.8%) carbonate zones are slightly lower than the overall average porosity measured in plug samples (0.95% and 1.08%, respectively). However, the porosity estimates from each method correspond very well and the overall difference between both carbonate zones was preserved. In addition, GPR instantaneous amplitude and frequency attributes distinguished satisfactorily both carbonate zones and provided predicted porosity volumes (Fig. 10). These positive results demonstrate potential implications for assessment of 3D distribution of petrophysical properties at the interwell scale to populate inputs for reservoir simulation in a Salitre carbonate reservoir analog using high-resolution GPR data. Certainly, 3D porosity estimation requires systematic porosity measurements on surface and boreholes, more accurate velocity models to calculate dielectric permittivity, and more effective calibration of the relations between the petrophysical properties and GPR attributes using geostatistical analysis. Further studies should introduce these improvements to allow for better constraint of the CRIM petrophysical model and refining 3D estimates of porosity for the carbonate Salitre Formation.

In addition to the dissolution caused by weathering, centimeter- to meter-scale cavities and vugs are present in the study area (Fig. 5). These karstic features were generated by the karstification and speleogenesis processes that formed the cave systems. They are important heterogeneities in both porosity and permeability in the carbonate formation, but they were not considered in the present GPR survey. Their geometric and petrophysical characterization should be addressed with other imaging approaches. Therefore, they can be useful to guide seismic signature interpretation and reservoir fluid flow simulation for karstified carbonate reservoirs.

6.2. 3D Geometric Characterization

The relationships between GPR shadow zones and dissolved carbonate rocks were determined based on plug sample analysis. In the studied quarry, the sample measurements reveal that the dissolution along fractures causes changes in physical and petrophysical

properties. Density and dielectric permittivity decrease, while porosity increases in the altered zones. As a result, an overall reduction of EM impedance contrasts take place between carbonate bedding and structures, with a notable attenuation of GPR amplitudes (Figs. 4, 6, 9 and 11). The reflections are attenuated, but their lateral continuity is preserved (Fig. 9), indicating that the carbonate dissolution affects the mineral content more than the thin bedding of the host rock. The sub-vertical amplitude shadow zones form sets of orthogonal bands in depth (Fig. 10), similar to the fracture network that controlled both the karstification of the TBV-TBR cave system and the more recent weathering. Different events of dissolution were nucleated by the NNE-SSW- and E-W-striking conjugate fractures, which acted as pathway for fluid circulation. Laterally extensive amplitude shadow zones (Figs. 4 and 11) indicate horizontal redirection of the flow when they reached a hydraulic barrier composed by a less permeable stratigraphic unit.

In general, large karst systems are associated with regional deformation, as in the case of the Ellenburger carbonate reservoir in west Texas (Gale and Gomez, 2007; Harbi and McMechan, 2011). Steeply dipping conjugate micro- and macrofractures controlled fluid migration and paleocave system in the Ellenburger dolomites, associated with the Pennsylvanian Ouachita orogeny. Similarly, the TBV-TBR cave system is controlled by fractures and folds related to the Neoproterozoic Brasiliano orogeny, which deformed the São Francisco Craton and surrounding fold belts (Klimchouk et al., 2016; Auler et al., 2017). Detailed structural analysis pointed out a close relationship between patterns of karst pathways around conjugate joints and anticlines and regional deformation events in a compressive collisional setting (Ennes-Silva et al., 2016).

Fractured crystalline basement reservoirs exhibit similar characteristics with carbonate reservoirs. Both crystalline and carbonate rocks have typically low primary porosity and permeability and the storage of hydrocarbon and ground water is intrinsically related to fracture properties resulting from combinations of tectonic, hydrothermal and epithermal processes (e.g., Questiaux et al., 2010; Trice, 2018). The typical dissolution of calcium carbonate enhances the potential for fluid storage in carbonate reservoirs, whereas this process is much less common in basement reservoirs. Despite this mineralogical difference between carbonate and basement reservoirs, we adapted the conceptual model of the fracture network of the Lancaster basement reservoir (North Sea) and its outcrop analog (Isle of Lewis) developed by Trice (2018) to analysis the potential for enhancement of secondary porosity and fracture connectivity in the studied quarry (Fig. 12).

Considering the studied quarry a carbonate reservoir analog, the background consists of very low porosity (<1.0%) carbonate rocks that support no reasonable background flow. However, we identified four different zones, where primary porosity is enhanced by fracturing and dissolution: a) the zones with highest porosity in the studied quarry are associated with mazelike 1-4 m height and 1-3 m width passages developed along the conjugate NNE-SSW (0° to 20°) and ~E-W (70° – 100°) trending fracture network (Fig. 12). According to (Klimchouk et al., 2016) and Auler et al. (2017), large-scale ascending fluid migration across the São Francisco Craton caused deep-seated karstification in the Neoproterozoic carbonate mega-sequences, creating the large system of caves and passages; b) the NE-SW (40°-50°) oriented fracture zones controlled a secondary set of passages, providing more high porosity zones and additional connectivity of the fracture network (Fig. 12); c) the centimeter- to meter-scale karstic features are another important high porosity zones in the carbonate analog reservoir, providing space for fluid flow and accumulation. The intermediate connectivity of these structures is quite complex and anisotropic, depending greatly on their size and intensity of occurrence; and d) the weathered zones provide local enhanced porosity and connectivity due to mineral dissolution along the sub-vertical fractures and horizontal carbonate bedding. In the studied quarry, 12 m deep and 25 m wide weathered zones can play an important role in fluid flow and accumulation in a carbonate reservoir.

Fig. 12. Schematic representation of the carbonate quarry showing four zones with enhanced porosity by fracturing and dissolution (description in the text).

7. Conclusions

In this study, we used GPR attributes to characterize the distribution of estimate porosity of the uppermost speleostratigraphic level of the large TBV-TBR cave system in the Precambrian Salitre Formation in a small quarry in East Brazil. Sub-vertical or horizontal, low-amplitude GPR zones are associated with beige color weathered carbonate rocks, nucleated by steeply inclined fractures. Amplitude and frequency instantaneous attributes enhance the GPR patterns of the non-altered and altered carbonate zones and allow mapping their 3D mazelike geometry. The NNE-SSW and E-W directions of the altered carbonate zones are similar to the regional fracturing trends that control the cave systems and the outcropping passages in the studied quarry.

Measurements in plug samples indicate that the meteoric water flowed through fractures and karstic features and decreased the relative dielectric permittivity and slightly

increased the porosity in a quite linear fashion. This change in the electrical properties affected the GPR signal, enabling us to estimate the 3D average porosity distribution of the karstic zones. Furthermore, predicted porosity was also calculated from EM velocities derived relative dielectric permittivity using the Complex Refractive Index Model (CRIM). CRIM porosities for non-altered and altered rocks are consistent with average porosities from plug samples, showing that the GPR volumes represent a very satisfactory porosity distribution of the slightly karstified Salitre carbonates in the studied quarry. The GPR volumes provide quantitative estimates of the spatial distribution of karstified carbonate reservoir porosity at the outcrop scale that can be used in carbonate reservoir characterization. However, future research should expand to larger scales the plug samples measurements, including boreholes, EM velocity analysis and GPR attributes in order to better calibrate the relationships between electrical and petrophysical properties.

Acknowledgements

This research was supported by Petrobras and Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Advanced Project of acquisition and interpretation of parameters for characterization and modeling of carbonate reservoirs – Procarste Project – Grant N° 2015/00369-0. We thank the Brazilian Oil Agency (Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis, ANP). We wish to thank to Dr Narendra K. Srivastava for his help with petrographic analysis and dissolution processes. IMMC thanks Petrobras for her MSc scholarship and DLC and FHRB thank the Brazilian Scientific Council (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq) for their research grants.

References

- Agosta, F., Alessandrini, M., Antonellini, M., Tondi, E., and Giorgioni, M., 2010, From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics*, 490, 197–213.
- Almeida, F.F.M., Brito Neves, B.B., Carneiro, C.D.R., 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews* 50, 77-111.
- Amthor, J., and G. Friedman, 1991, Dolomite-rock textures and secondary porosity development in Ellenburger Group carbonates (Lower Ordovician), west Texas and southeastern New Mexico: *Sedimentology*, 38, 343–362.

- Auler, A.S., Smart, P.L., 2003. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid Northeastern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 157–168.
- Auler, A.S., Klimchouk, A., Bezerra, F.H.R., Cazarin, C.L., Ennes-Silva, R., Balsamo, F., 2017. Origin and Evolution of Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda Cave System in North-eastern Brazil. In: Editors: Klimchouk, A., N. Palmer, A., De Waele, J., Auler, A.S., Audra, P. (Org.), *Cave and Karst Systems of the World*, 1ed. Springer International Publishing, Berlim, 827-840.
- Billi, A., 2005. Grain size distribution and thickness of breccia and gouge zones from thin (<1 m) strike-slip fault cores in limestone. *Journal of Structural Geology*, 27, 1823–1837.
- Birchak, J.R., Gardner, C.G., Hipp, J.E., Victor, J.M., 1974. High Dielectric Constant Microwave Probes for Sensing Soil Moisture Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 62 (1), 93–98.
- Brito Neves, B.B., and Cordani, U.G., 1991, Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53, 23-40.
- Cassidy, N.J., 2007, Evaluating LNAPL contamination using GPR and dielectric analysis: Practical implications for signal attenuation and attribute analysis studies. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94 (1–2), 49–75.
- Corbeanu, R., G. A. McMechan, R. Szerbiak, and K. Soegaard, 2002, Prediction of 3D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah: *Geophysics*, 67, 1495–1504.
- Daniels, D.J., 1996, *Surface Penetrating Radar, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series* 6, The Institute of Electrical Engineers, London, UK.
- Endres, A. and Knight, R., 1992, A theoretical treatment of the of microscopic fluid distribution on the dielectric properties of partially saturated rocks. *Geophysical Prospecting*, 37, 531–551.
- Ennes-Silva, R.A., Bezerra, F.H.R., Nogueira, F.C.C., Balsamo, F., Klimchouk, A., Cazarin, C.L., Auler, A.S., 2016. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, 666, 244-259.
- Fernandes Jr., A.L., Medeiros, W.E., Bezerra, F.H.R., Oliveira, J.G., Cazarin, C.L., 2015. GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery. *Journal of Applied Geophysics*, 112, 268-278.

- Forster, C. B., H. Snelgrove, S. J. Lim, R. M. Corbeanu, G. A. McMechan, K. Soegaard, R. B. Szerbiak, L. Crossey, and K. Roche, 2004. 3D fluid flow simulation in a clastic reservoir analogue, based in integration 3D GPR and outcrop data from the Ferron Sandstone at Coyote Basin, Utah. In T. C. Chidsey, R. D. Adams, and T. H. Morris, eds., Regional to wellbore analog for fluvial-deltaic reservoir modeling: The Ferron Sandstone of Utah, AAPG in Geology, 50, 405–425.
- Gale, J., and L. Gomez, 2007, Late opening-mode fractures in karst brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: recognition, characterization, and implications for fluid flow: AAPG Bulletin, 91, 1005–1023.
- Gawthorpe, R.L., Collier, R.E.L., Alexander, J., Bridge, J.S., Leeder, M.R., 1993. Ground-penetrating radar: application to sandbody geometry and heterogeneity studies. In North, C.P., Prosser, D.J. Eds., Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs. The Geological Society, Special Publication No. 73, pp. 421–432.
- Harbi, H. and McMechan, G.A., 2011, Modeling 3D porosity and permeability from GPR data in the Ellenburger Dolomite, central Texas. Geophysics, 76 (6), J35–J46.
- Klimchouk, A., Auler, A.S., Bezerra, F.H.R., Cazarin, C.L., Balsamo, F., and Dublyansky, Y., 2016, Hypogenic origin, geologic controls and functional organization of a giant cave system in Precambrian carbonates, Brazil. Geomorphology, 253, 385–405.
- Lonergan, L., Jolly, R.H.J., Rawnsley, K., Sanderson, D.J., 2007. Fractured reservoirs. Geological Society of London, Special Publication, 270, 279pp.
- Loucks, R.G., Mescher, P., McMechan, G.A., 2004. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Central Texas. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 88, 545–564.
- Lucia, F.J., 2007. Carbonate Reservoir Characterization electronic resource: An Integrated Approach. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 226pp.
- Misi, A., and Kyle, J.R., 1994, Upper Proterozoic carbonate stratigraphy, diagenesis, and stromatolitic phosphorite formation, Ireê Basin, Bahia, Brazil. J. Sediment. Res. A64, 299–310.
- Mount, G.J., Comas, X. and Cunningham, K.J., 2014, Characterization of the porosity distribution in the upper part of the karst Biscayne aquifer using common offset ground penetrating radar, Everglades National Park, Florida. Journal of Hydrology, 515, 223–236.
- Questiaux, J.M., Couples, G.D., Ruby, N., 2010. Fractured reservoirs with fracture corridors. Geophysical Prospecting, 58, 279–295.

- 585 Reis Jr, J.A., de Castro, D.L., Jesus, T.E.S., Lima Filho, F.P., 2014, Characterization of
586 collapsed paleocave systems using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, 103,
587 43-53.
- 588 Robertson, J.D. and Nogami, H.H., 1984, Complex seismic trace analysis of thin beds:
589 *Geophysics*, 49, 344–352.
- 590 Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R.E., 1979, Complex trace analysis. *Geophysics*, 44,
591 1041-1063.
- 592 Trice, R., 2014. Basement exploration, West of Shetlands: progress in opening a new play on
593 the UKCS. In Cannon, S. J. C. & Ellis, D. (eds) *Hydrocarbon Exploration to Exploitation*
594 *West of Shetlands*. Geological Society, London, Special Publications, 397 (1), 81-106.
- 595 Tronicke, J., and Paasche, H., 2017, Integrated interpretation of 2D ground-penetrating radar,
596 P-, and S-wave velocity models in terms of petrophysical properties: Assessing
597 uncertainties related to data inversion and petrophysical relations. *Interpretation*, 5 (1),
598 T121–T130.

Figures

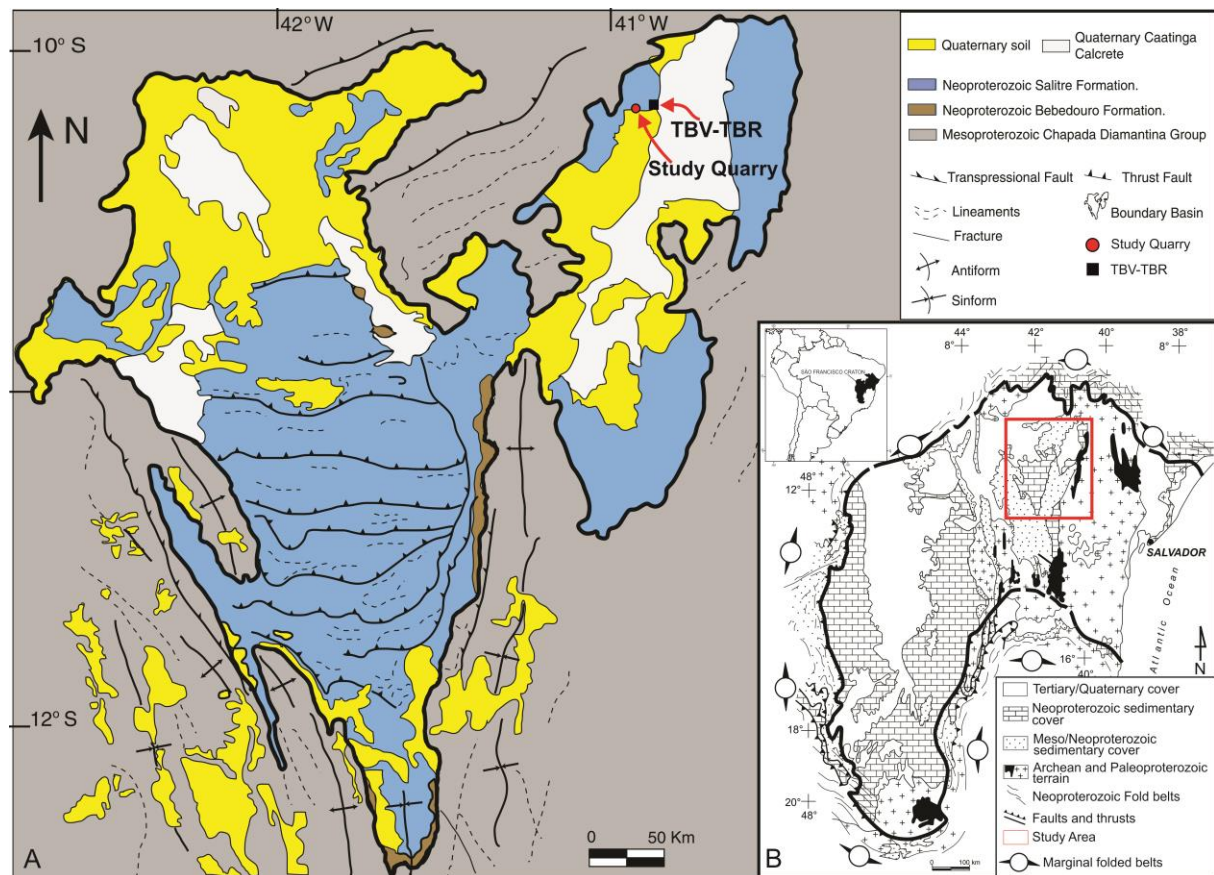


Figure 1: Geological maps of the São Francisco Craton (A) and the Irecê Basin (B) in East Brazil, with location of the studied quarry near the Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda (TBV-TBR) cave system.

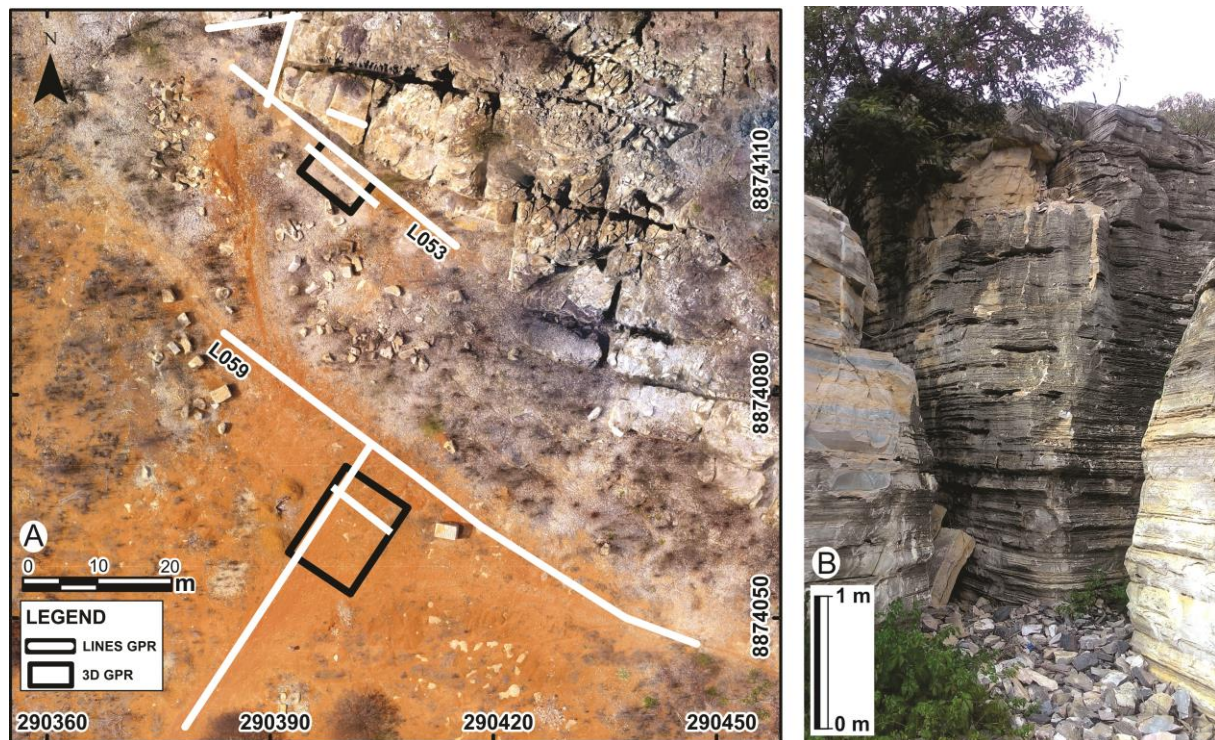


Figure 2: Karstic features controlled by NNE-SSW and E-W trending fracture system in the studied quarry with location of the GPR survey: A – unmanned aerial vehicle image with location of GPR lines; B – sub-vertical and orthogonal passage system and karstic cavities along sub-horizontal bedding.

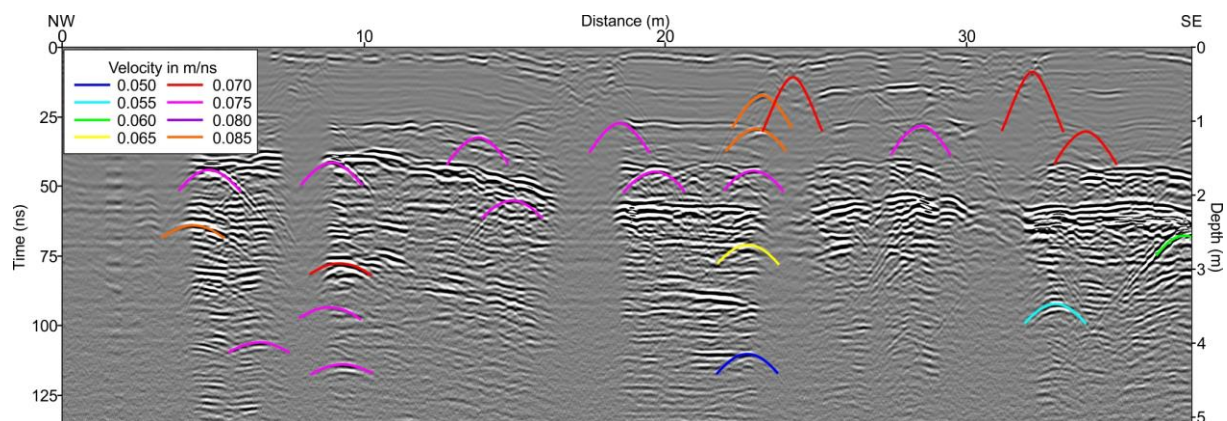


Figure 3: GPR profile L053 (location in Figure 2a) showing hyperbolic diffractions highlighted with associated estimated EM velocities in m/ns.

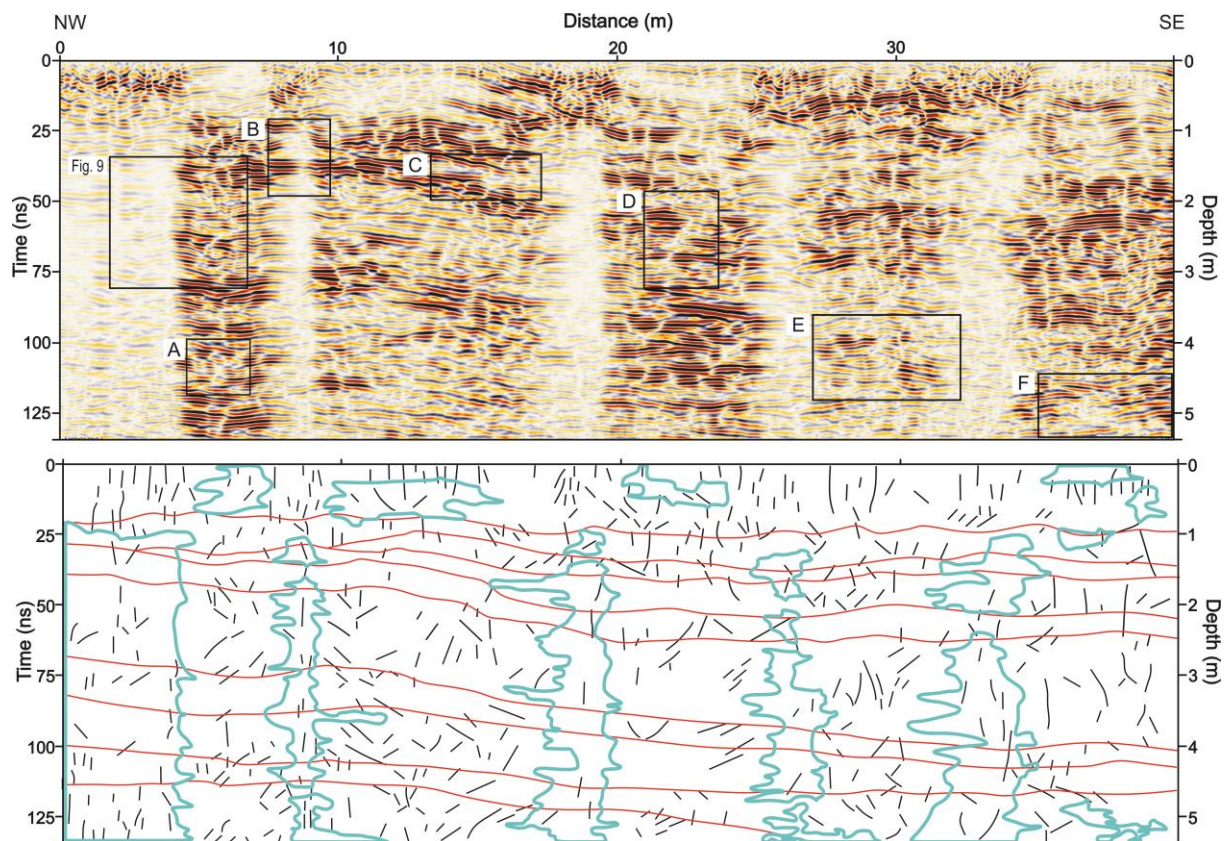


Figure 4: GPR signature of the fractured and altered carbonate unit (low amplitude zones) in the studied quarry. The location of the Profile L053 is in Figure 2a. Rectangles highlight areas where karstic features, shown in Figure 5, are identified in the GPR data.

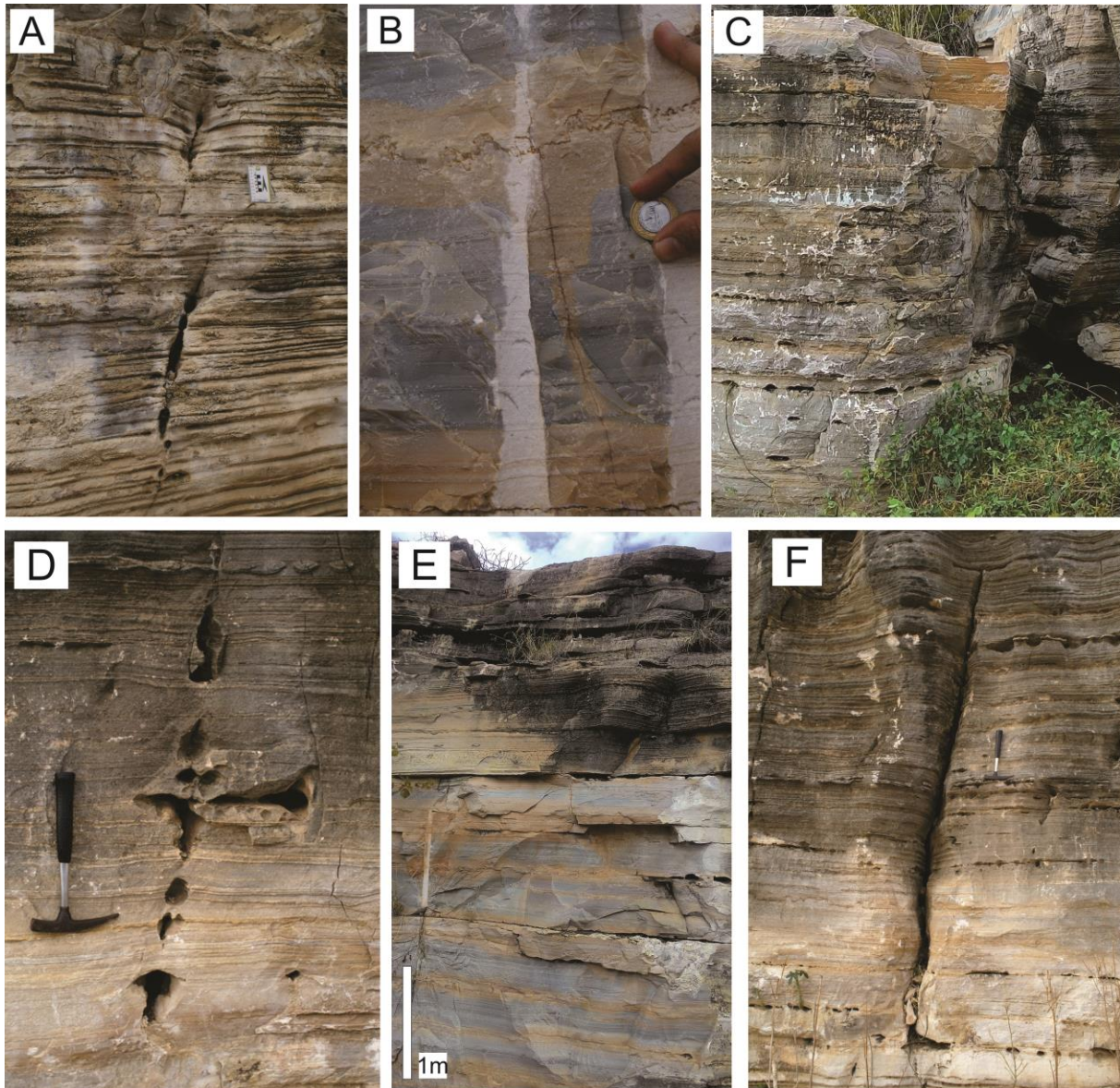


Figure 5: Karstic features exposed in the studied quarry and identified in the GPR profile (Fig. 4): sub-vertical fracture-controlled cavities (A, C and F); non-altered (blue gray) and altered (beige) carbonate zones (B and E) along fractures and bedding planes; and sub-horizontal cavities along bedding planes (C).

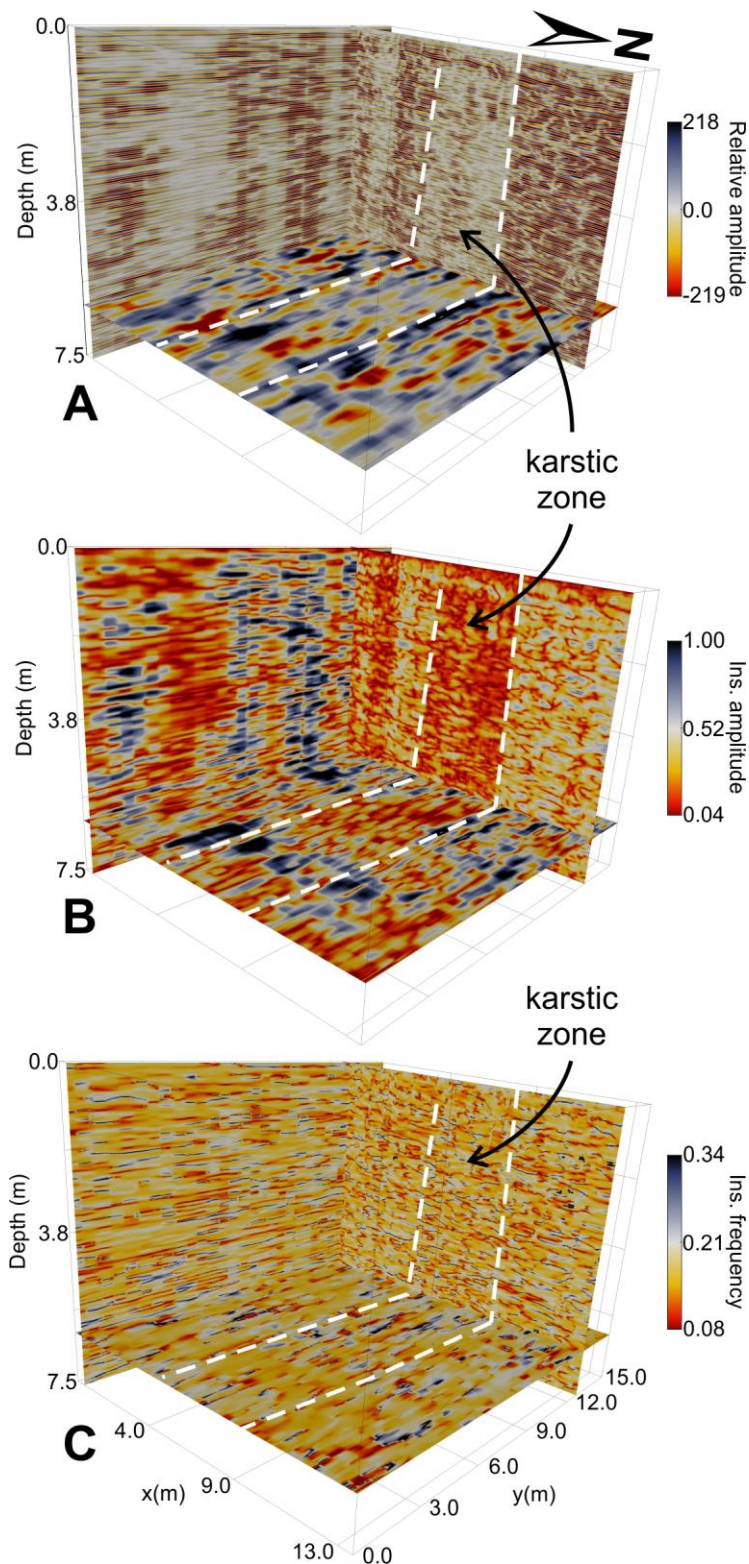


Figure 6: Three-dimensional view of the GPR data set (A) and Instantaneous Amplitude (B) and Frequency (C) attributes, showing the amplitude shadow zones associated to dissolved areas.

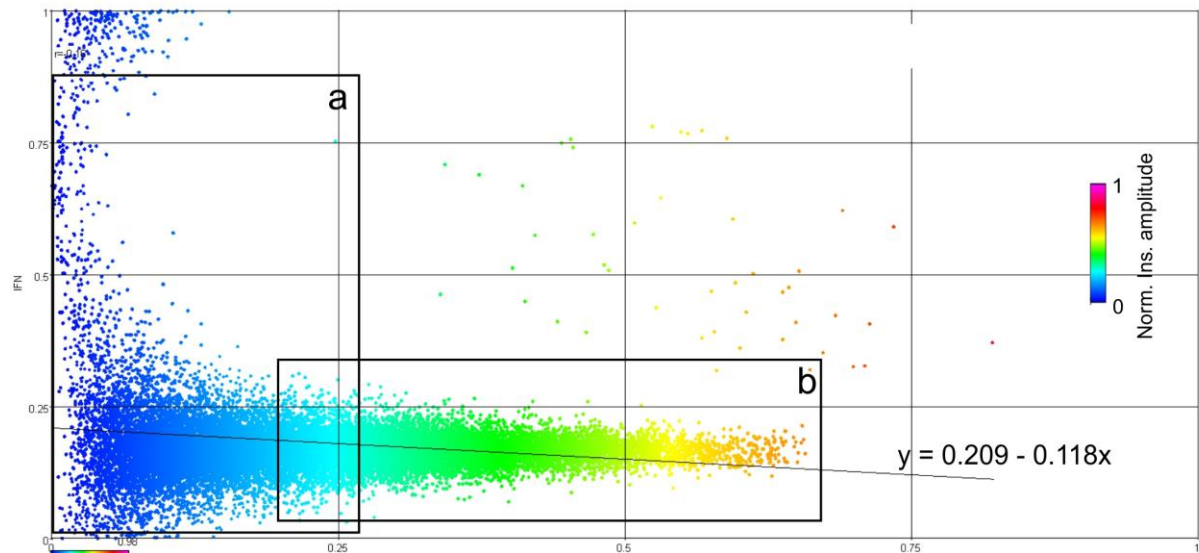


Figure 7: Crossplot of the normalized Instantaneous Amplitude (NIA) and Frequency (NIF) attributes, showing the two clusters of altered (a) and non-altered (b) carbonate populations.

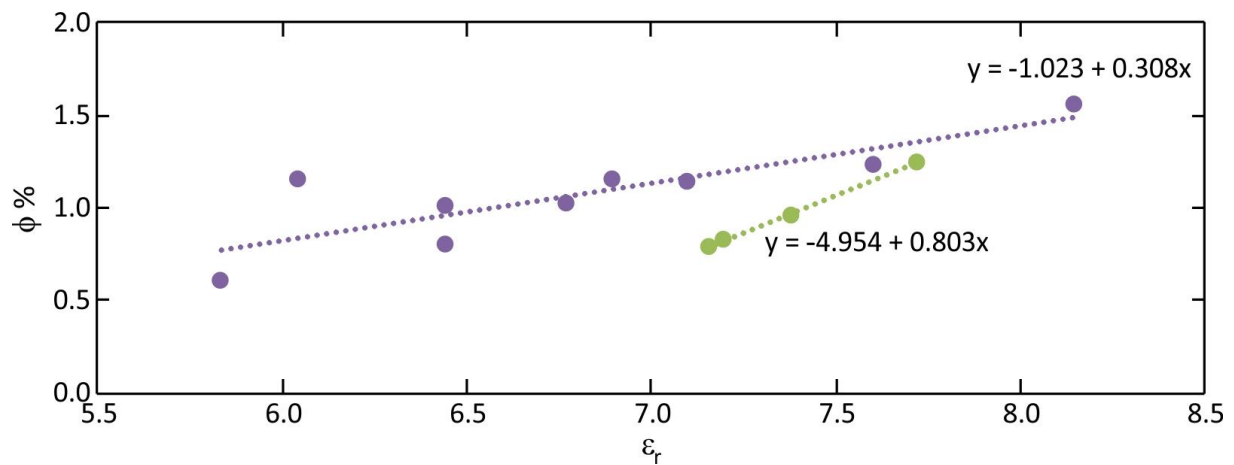


Figure 8: Correlation between porosity (ϕ in %) and relative dielectric permittivity (ϵ_r) of the non-altered (green) and altered (purple) carbonate rock samples.

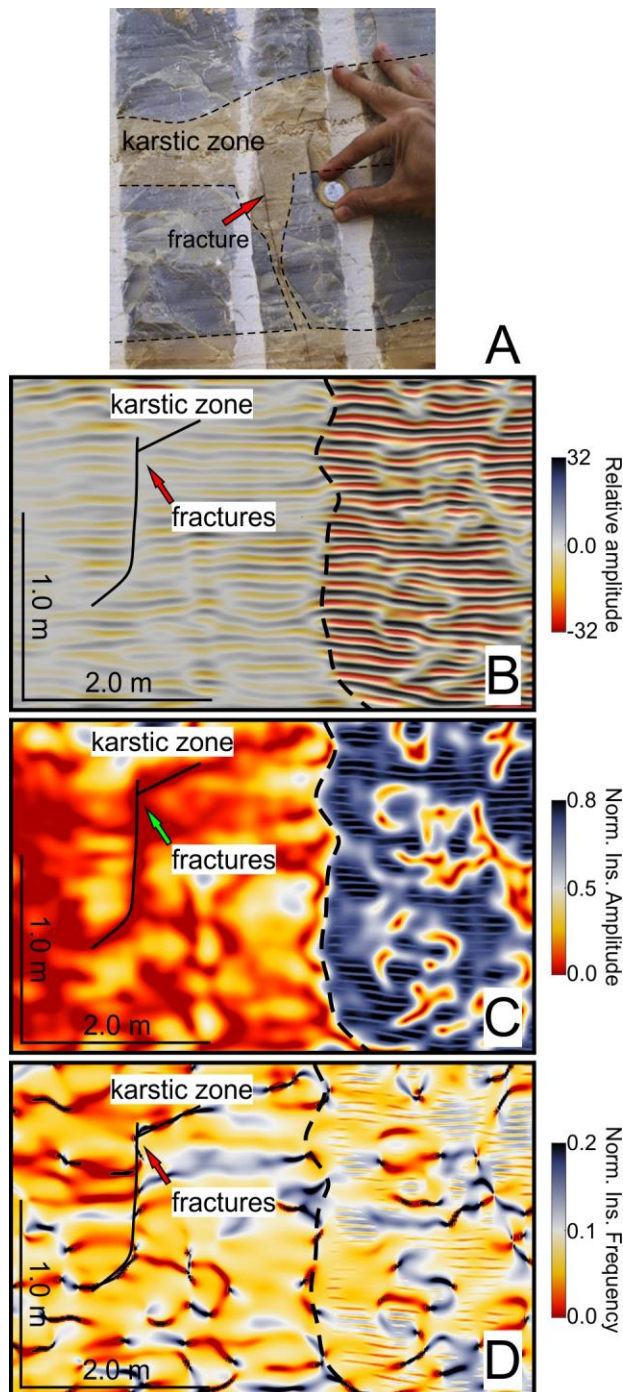


Figure 9: Altered halos along bedding planes associated with fractures in the carbonate rocks (A) and their GPR responses (B) and normalized instantaneous amplitude (C) and frequency GPR patterns (D).

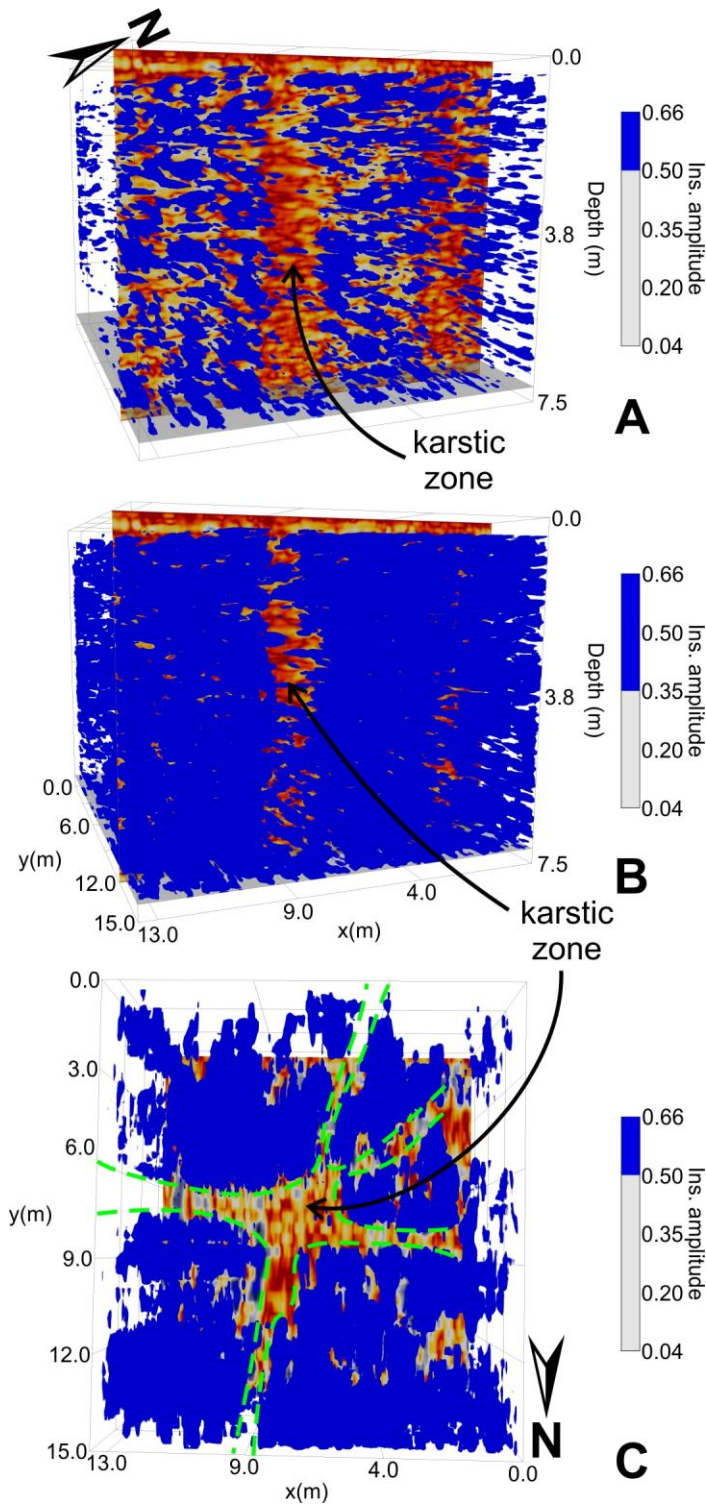


Figure 10: Predicted porosity cubes derived from GPR data. Blue areas represent lower-porosity, non-altered zones, where normalized instantaneous amplitude (NIA) is greater than 0.5 (A) or 0.35 (B). The plan view of the porosity cube is shown in C. A NIA profile (A and B) and a NIA time slice (C) show the higher-porosity, altered halos indicated by orange color (see the color table in Figure 9c).

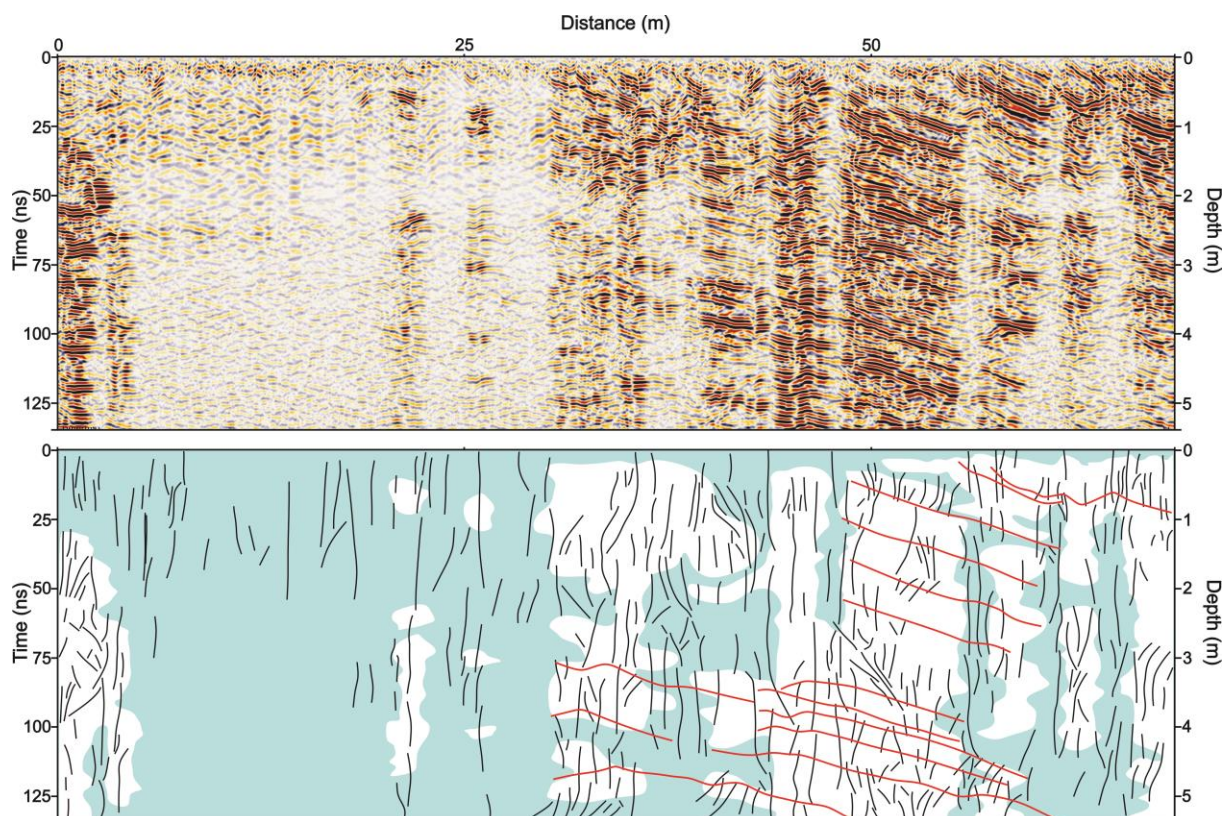


Figure 11: GPR Profile L059 showing sub-vertical amplitude shadow zones, related with altered halos and karstic features developed around fractures (light blue areas), and slightly undulated sequences of reflections (red lines).

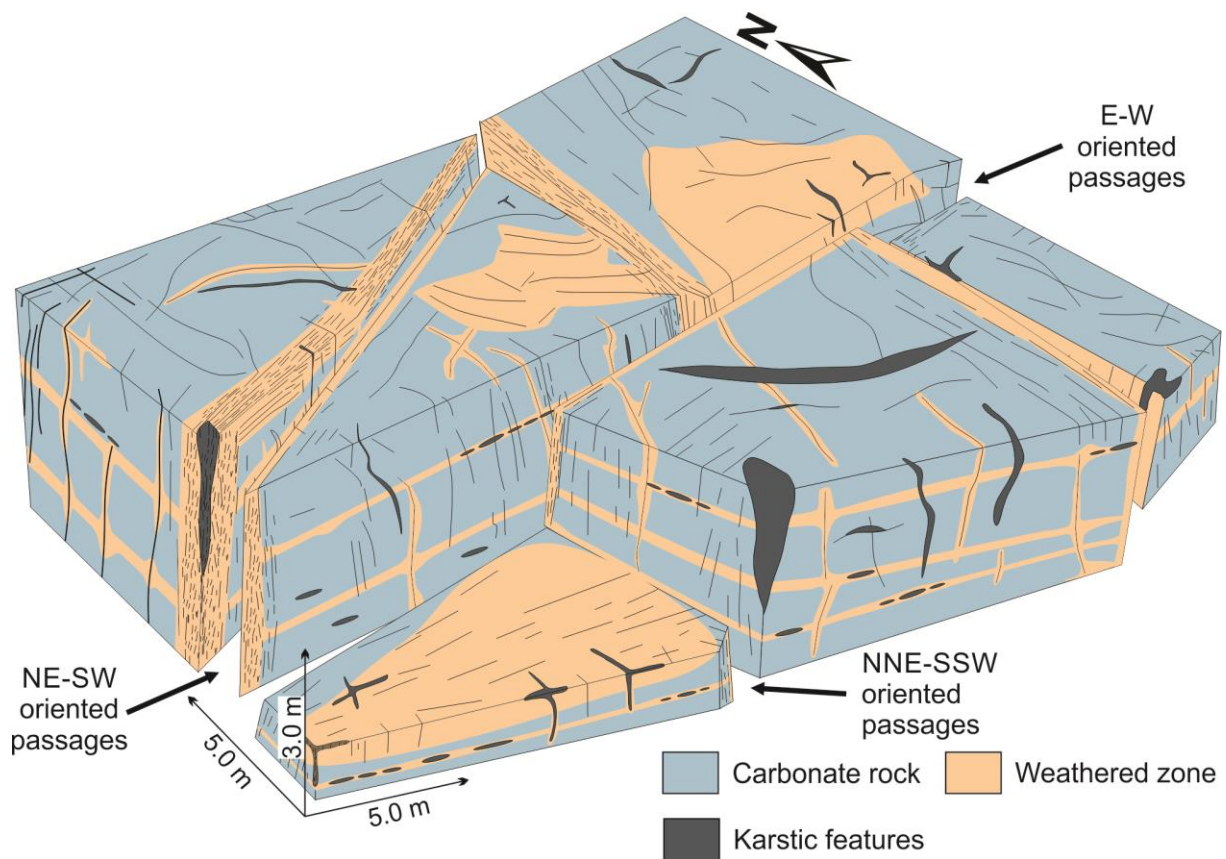


Figure 12: Schematic representation of the carbonate quarry showing four zones with enhanced porosity by fracturing and dissolution (description in the text).

Tables

Sample	Alteration	ϕ	ϵ_r	ρ
01LB	no	0.96	7.38	2701
02MI	no	1.24	7.72	2670
03MOZ	no	0.82	7.20	2688
04LC	no	0.79	7.15	2692
05PB	yes	1.15	6.04	2699
06DB	yes	0.80	6.44	2672
07BA	yes	1.14	7.09	2673
08S(90)	yes	1.01	6.44	2675
09RA	yes	1.15	6.89	2694
10UA	yes	0.60	5.83	2704
11UB	yes	1.23	7.60	2673
12PA	yes	1.02	6.77	2689

Table 1: Physical and petrophysical properties of carbonate rocks in the Sal quarry. ϕ : porosity in %, ϵ_r : relative dielectric permittivity, ρ : density in kg/m³.

Capítulo V – Conclusões

Neste trabalho, utilizamos atributos GPR para caracterizar a distribuição da porosidade estimada em rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas da Formação Salitre no Cráton São Francisco. As rochas carbonáticas que afloram na Pedreira Sal na região de Laje do Negros (norte da Bahia), correspondem a unidade estratigráfica mais superior (Fácies 7), que, por sua vez, representa o nível espeleoestratigráfico superior do sistema de cavernas Toca da Boa Vista e Toca da Barriguda. Zonas de baixa amplitude nas seções GPR estão associadas as rochas carbonáticas alteradas (cor bege) ao redor de fraturas sub-verticais. Os atributos de amplitude instantânea e frequência instantânea realçaram os padrões de reflexão GPR nas zonas alteradas e não alteradas, permitindo o mapeamento da geometria interna do análogo de reservatório. As medidas realizadas nas amostras de rochas indicam que os valores de permissividade dielétrica relativa diminuíram e a porosidade aumentou de forma linear. Essa diminuição de permissividade afetou o sinal GPR, o que permitiu estimar a porosidade e caracterizar sua distribuição 3D nas zonas cársticas. Usando o Modelo de Índice de Refração Complexo (CRIM), foi calculada a porosidade prevista a partir da permissividade dielétrica relativa derivada da velocidade estimada de dados GPR. Os valores obtidos para rochas não alteradas e alteradas são consistentes com a porosidade média medidas nas amostras de rocha. Isso mostra que a estimativa de porosidade com base nos dados GPR representara uma distribuição de porosidade muito satisfatória. As zonas de dissolução mineral vistas nas seções GPR nas direções ~ NNE-SSW e E-W são semelhantes às tendências regionais de faturamento. Os volumes GPR fornecem uma estimativa da distribuição espacial da porosidade em escala de afloramento que pode ser utilizada para a caracterização de reservatórios de carbonáticos.

Para pesquisas futuras, sugere-se que as medidas petrofísicas sejam expandidas para escalas maiores, como furos de sondagem. Também é importante obter uma análise de velocidade com maior precisão para gerar um volume de porosidade estimada mais acurado, assim como, realizar uma análise de atributos com base em medidas de porosidade de amostras de subsuperfície. Desta forma,

haverá uma melhor calibração dos dados a fim de se obter uma estimativa de volume de porosidade preciso para a exploração de reservatórios.

Referências

AHR W.M. 2008. Geology of carbonate reservoirs: The identification. Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs. New Jersey: Wiley.

AL-FARES W., BAKALOWICZ M., GUÉRIN R., DUKHAN M. 2002. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 51: 97-106.

ALKMIM F. F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C. D. R, Brito-Neves B. B. (org.) *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p.17-35.

ALMEIDA F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Rio de Janeiro, DNPM – DGM, Boletim, 241, 36p.

ALMEIDA F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 23, Salvador, Anais: 29 – 46.

ALMEIDA F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista brasileira de geociências*. 7: 349-364.

ALSHARAH G., DRIOUACH A., FAIZE A. 2016. Performance of GPR Influenced by Electrical Conductivity and Dielectric Constant. *Procedia Technology*, 22: 570-575.

ARCHIE G.E. 1950. Introduction to petrophysics of reservoir rocks. *AAPG Bulletin*, 34: 943-961.

BARBOSA J.S.F., SABATÉ P., MARINHO M.M. 2003. O Cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese. *Revista brasileira de geociências*. 33: 3-6.

BIRCHAK J.R., GARDNER C.G., HIPPEL J.E., VICTOR J.M. 1974. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proc. IEEE*, 62: 93-98.

BRITO NEVES B.B., SANTOS E.J. VAN SCHMUS W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema province. In: U.G. Cordani; E.J. Milani; A Thomaz Filho; D.A. Campos (eds.) *Tectonic Evolution of the South America*. 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 151 – 182.

CHOPRA S., MARFURT K.J. 2005. Seismic attributes - A historical perspective. *GEOPHYSICS*, 70: 5.

CORBEANU R., MCMECHAN G.A., SZERBIAK R. AND SOEGAARD K. 2002. Prediction of 3D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah. *Geophysics*, 67: 1495–1504.

EHRLICH P. 1953. Dielectric properties of Teflon from room temperature to 314° C and from frequencies of 102 to 105 c/s. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 51(4): 185-188.

ENNES-SILVA R.A., BEZERRA F.H.R., NOGUEIRA F.C.C., BALSAMO F., KLIMCHOUK A., CAZARIN C.L., AULER A.S. 2016. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, 666: 244-259.

FERNANDES A.L. 2014. Interpretação de imagens de GPR em ambiente cárstico guiada por comparação com afloramentos e imagens de veículo aéreo não tripulado. *Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. 71 p.*

FORTE E., PIPAN M. 2017. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. *Signal Processing*, 132: 210-220.

GUIMARÃES J. T., DOMINGUEZ J. M. L. 1995. Caracterização faciológica da Formação Bebedouro (Proterozóico Superior) no Estado da Bahia. In: *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS*, 8, 1995, Diamantina. *Anais...* Diamantina: SBG

- Núcleo Minas Gerais, Instituto de Geociências da UFMG, (Boletim, 13) 148p. il. p. 107-108.

INDA H.A.V., BARBOSA J.S.F. 1978. Geologia da Bahia. Texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. SICM/SGM, Salvador, 137 p.

JESUS T.E.S., REIS JR J.A., CASTRO D.L., LIMA-FILHO F.P. 2012. Imageamento digital de paleocavernas colapsadas com ground penetrating radar. Geologia USP, Série científica, São Paulo, 12 (3): 71-84.

JOL H.M. 2009. Ground penetrating radar: Theory and applications. First edition. Elsevier Sciences, 524 p.

KEAREY P, HILL I. 2009. Geofísica de exploração. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos.

KLIMCHOUK A., AULER A.S., BEZERRA F.H.R., CAZARIN C.L., BALSAMO F., DUBLYANSKY Y. 2016. Hypogenic origin, geologic controls and functional organization of a giant cave system in Precambrian carbonates, Brazil. Geomorphology, 253: 385-405.

LEÃO Z.M.A.N., DOMINGUEZ J.M.L. 1992. Plataformas carbonáticas Pré-Cambrianas: o exemplo da Formação Salitre, Proterozóico Superior, estado da Bahia. Revista brasileira de geociências. 22: 407-421.

MOUNT G.J., COMAS X. 2014. Estimating porosity and solid dielectric permittivity in the Miami Limestone using high-frequency ground penetrating radar (GPR) measurements at the laboratory scale. Water Resources Research, 50: 7590–7605.

MOUNT G.J., COMAS X. AND CUNNINGHAM K.J. 2014. Characterization of the porosity distribution in the upper part of the karst Biscayne aquifer using common offset ground penetrating radar, Everglades National Park, Florida. Journal of Hydrology, 515: 223–236.

MOUTINHO DA COSTA L.A. & INDA H.A. V. 1982. O Aulacógeno do Espinhaço. Ciências da Terra, 2:13-18.

MURRAY R.C. 1960. Origin of porosity in carbonate rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 30: 59-84.

OLIVEIRA J.G. 2001. Dois testes de imageamento com GPR em problemas de controle ambiental em regiões tropicais: migração de dunas e localização de dutos de óleo enterrados. *Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica)* - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001. 95 p.

OVERMEEREN R.A. Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. 1998. *Journal of Applied Geophysics*, 40: 1-18.

PEDREIRA A.J., ROCHA A.J.D., GUIMARÃES J.T., BOMFIM L.F.C., MORAIS FILHO J.C., MOTTA A.C. 1985. Projeto Bacia de Irecê: Relatório da Etapa I, Volume I. Salvador: CPRM.

REPPERT P.M., MORGAN F.D., TOKSÖZ M.N. 2000. Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. *Journal of Applied Geophysics*, 43:189-197.

REYNOLDS JM. 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. New York : John Wiley.

SANDMEIER KJ. 2000. REFLEXW Version 6.0, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or eletromagnetic reflection, refraction and transmission data. Germany. 272 p.

SANTOS C.P.M. 2016. Petrologia das fraturas associadas a feições típicas de dissolução hipogênica na Formação Salitre, bacia de Irecê, Bahia, Brasil. *Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo)* Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. 469 p.

SCHLUMBERGER. Annual report, p.13, 2009.

SCHÖN J.H. Tradução Edson Furmankiewicz. 2014. Propriedades físicas das rochas aplicadas à engenharia: fundamentos teóricos e práticos. Rio de Janeiro: Editora Elsevier.

SUGUIO K. Geologia sedimentar. 2003. São Paulo: Editora Blucher.

USSAMI N. 1993. Estudos Geofísicos no Cráton do São Francisco: estágio atual e perspectivas. *In: J.M.L. Dominguez & A. Missi (eds.). In: SBG. Simp. Cráton do São Francisco, 2, Salvador, Bahia, Brasil. SBG/SGM/CNPq, Spec. Psubl, 35-62.*

WYLLIE M.R.J., GREGORY A.R. 1953. Formation Factors of Unconsolidated Porous Media: Influence of Particle Shape and Effect of Cementation. Society of Petroleum Engineers, 198: 103 – 110.

XAVIER NETO P. 2006. Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. 191 p.

YANG S. Fundamentals of Petrophysics (Second Edition). 2017. Beijing: Editora Springer Geophysics.

ZHAO W., FORTE E., PIPAN M., TIAN G. 2013. Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. Journal of Applied Geophysics, 97: 107-117.